В. М. Куцевалов
Л. А. Ковалюк

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ВНЕШНИМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Академия наук Латвийской ССР
Физико-энергетический институт

В.М.Куцевалов
Л.А.Ковалюк

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ВНЕШНИМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Издательство "Зинатне"
Рига 1973

В.М. К у ц е в а л о в , Л.А. К о в а л ю к . ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ВНЕШНИМ МАГНИТОПРОВОДОМ. Рига, "Зинатне", 1973, 88с.

Приведена методика электромагнитного расчета бесконтактных синхронных электродвигателей с внешним магнитопроводом. Необходимый для расчета справочный материал дан в виде таблиц, графиков в соответствии с международной системой единиц СИ. Табл. 2, илл. 27, библ. 104 назв.

К $\frac{3-3-10-159}{М811(11)-73}$

Введение

В настоящее время наиболее распространенными электродвигателями переменного тока являются асинхронные двигатели, простые по конструкции, технологичные в производстве и обладающие высокой надежностью в эксплуатации. Низковольтные асинхронные электродвигатели мощностью от 0,12 до 400 квт потребляют более 40 % всей электрической энергии, вырабатываемой энергосистемами страны [102].

Однако асинхронные электродвигатели уже не могут удовлетворять требованиям ряда конкретных приводов, в частности, таких, в которых: 1) по условиям технологии целесообразно постоянство скорости вращения двигателя независимо от величины его нагрузки; 2) по условиям технологии невозможно осуществить достаточно полную загрузку двигателя; 3) приводы получают питание от протяженных и сильно разветвленных сетей , и др. [104].

В таких приводах определенные преимущества имеют синхронные двигатели.

Отечественной промышленностью изготавливаются синхронные реактивные двигатели типа РС мощностью 1,1 ; 1,5 ; 3,0 и 4,0 квт на 1500 об/мин. Однако у этих двигателей низкие энергетические показатели - к.п.д., $\cos\varphi$ и малая перегрузочная способность.

Относительно двигателей с электромагнитным возбуждением до недавнего времени существовало мнение о нецелесообразности их применения при мощностях менее 50 - 100 квт из-за большей сложности конструкции и меньшей надежности, обусловленной наличием щеточно-контактного устройства.

Таблица I

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ УНИФИЦИРОВАННОЙ СЕРИИ СДБ, МАШИН СОУ 3I-4 и СЭ 42-4

Тип электродвигателя	При номинальной нагрузке					Перегрузочная способность	Асинхронный пуск			Вес, кг
	мощность, квт	скорость вращения, об/мин	ток статора (а) при напряжении		к.п.д.[x], %					
			220в	380в	cosφ	$M_{макс}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$	$M_{пуск}/M_{ном}$	$M_{вх}/M_{ном}$	
СДБ 3I-4	I,5	I500	5,0	2,9	78,0/I,0	Не менее I,5	Не более 3	Не менее 0,8	Не менее 0,25	56
СДБ 4I-4	3,0	I500	9,0	5,2	87,0/I,0					9I
СДБ 5I-4	5,5	I500	I6,6	9,6	88,0/I,0					I36
СДБ 7I-4	II,0	I500	32,6	I8,8	89,0/I,0					265
СДБ 8I-4	20,0	I500	58,5	33,4	9I,0/I,0					396
СДБ 9I-4	40,0	I500	II6,0	66,8	9I,5/I,0					500
СДБ 8I-6	I7,0	I000	48,I	28,8	89,7/I,0					396
СОУ 3I-4	I,5	I500	5,0	2,9	78,0/I,0	I,3	2,0	0,7	0,23	36
СЭ 42-4	3,0	I500	9,0	5,2	87,0/0,995	I,5	3,0	0,8	0,24	57

x) Значения к.п.д. даны с учетом потерь на возбуждение.

Латвийской ССР совместно с Истринским отделением ВНИИЭМ. По сравнению с распространенными типами асинхронных машин рассматриваемые электродвигатели оказываются более экономичными в эксплуатации, хотя имеют больший вес и стоимость.

Повышенный вес электродвигателей СДБ обусловлен унификацией основных узлов и деталей с бесконтактными синхронными генераторами серии СГВ.

Разработка бесконтактных синхронных электродвигателей специализированного исполнения (без унификации с другими машинами) позволяет приблизить их вес и стоимость к соответствующим по мощности асинхронным двигателям типа АО2. В качестве примера таких машин могут служить электродвигатели СОУ 3I-4 и СЭ 42-4, технические данные которых приведены также в таблице I.

2. Конструктивные особенности бесконтактных синхронных электродвигателей

Рассмотрению конструктивных особенностей синхронных бесконтактных машин с когтеобразными полюсами посвящен ряд работ [2, 4, 7 - I0, I3, I6 - I9, 22, 25 - 32, 34, 42 - 44, 46, 52, 58, 60, 64, 68, 76, 83, 87, 89, 96, I0I, I04].

Среди известных конструктивных решений бесконтактных синхронных машин с электромагнитным возбуждением наиболее простую конструкцию имеет бесконтактная машина с когтеобразными полюсами и внешним магнитопроводом. В качестве примера на рис. I-3 показаны варианты конструкции бесконтактной машины этого типа.

Статор бесконтактного синхронного двигателя не имеет принципиальных отличий от статоров обычных синхронных или асинхронных двигателей.

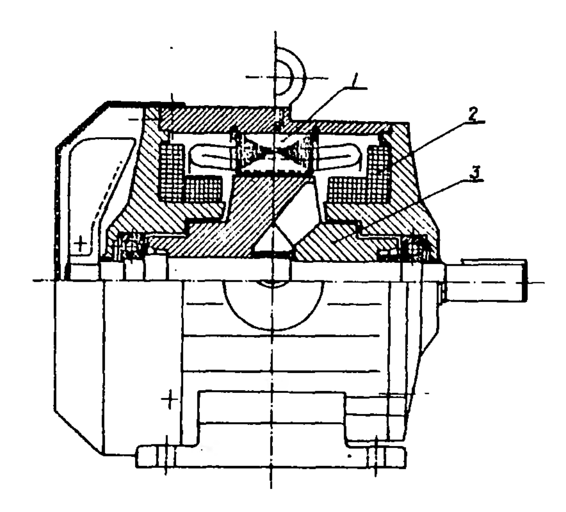


Рис. I. Устройство бесконтактного синхронного электродвигателя СО 5I-6 первой опытной серии, разработанной в ФЭИ АН Латв ССР [52] : I - статор с обмотками (главной и дополнительной); 2 - неподвижные обмотки возбуждения; 3 - ротор с массивными когтеобразными полюсами.

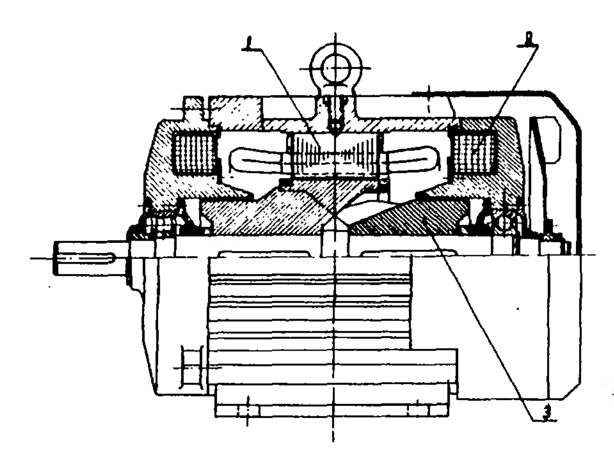


Рис. 2. Устройство бесконтактного синхронного электродвигателя СДБ 8I-4: I - статор с обмоткой; 2 - неподвижные обмотки возбуждения; 3 - ротор с массивными когтеобразными полюсами [I04].

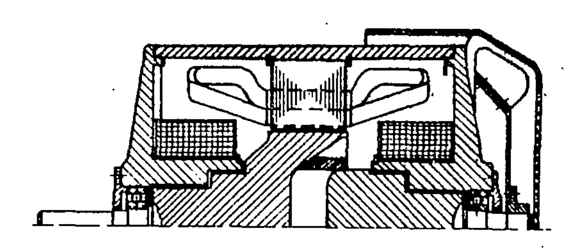


Рис. 3. Устройство бесконтактного синхронного электродвигателя СЭ 42-4.

Стальная станина может быть выполнена ребристой (рис.I,2) или гладкой (рис. 3).

Двигатель охлаждается потоком воздуха от вентилятора, расположенного на втором (нерабочем) конце вала и закрытого кожухом, который направляет поток охлаждающего воздуха вдоль станины.

Ротор состоит из двух насаженных на вал (рис. I, 2) или сваренных между собой полюсных систем (рис. 3).

Кольцевые выступы стальных подшипниковых щитов, охватывающие цилиндрические части полюсных систем ротора, образуют с последними два дополнительных воздушных зазора между вращающейся частью магнитопровода индуктора - полюсными системами с когтеобразными полюсами - и неподвижной его частью - подшипниковыми щитами и станиной.

На кольцевых выступах подшипниковых щитов размещаются катушки обмотки возбуждения, что значительно упрощает конструкцию этой обмотки по сравнению с обмоткой ротора обычного явнополюсного исполнения, в особенности при большом числе полюсов.

Поскольку обмотка возбуждения располагается на значитель-

ном расстоянии от активных поверхностей полюсов, в машине имеются развитые магнитные потоки рассеяния, относительная величина которых оказывается более высокой, чем в роторе обычной явнополюсной конструкции.

Распределение магнитных потоков в бесконтактном синхронном двигателе показано на рис. 4.

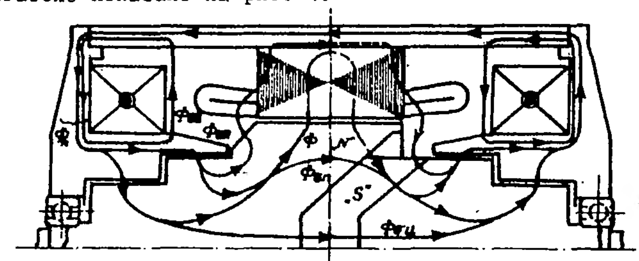


Рис. 4. Потоки рассеяния индуктора машины с когтеобразными полюсами и внешним магнитопроводом: Ф$_П$ - полный магнитный поток машины; Ф - полезный поток; Ф$_{бв}$ - поток рассеяния обмотки возбуждения; Ф$_{бя}$ - поток внешнего рассеяния полюсов; Ф$_{бп}$ - поток межполюсного рассеяния; Ф$_{бц}$ - поток рассеяния по торцам цилиндров полюсных систем [76].

Стремление уменьшить потоки рассеяния в роторе привело к тому, что в ряде машин вал изготавливается из немагнитной стали или же сварным с немагнитной вставкой между полюсными системами.

С той же целью выполняют сварную конструкцию роторов без сплошного вала (см. рис. 3).

В бесконтактных машинах рассматриваемого типа оказывается нецелесообразным увеличение относительной длины* более Λ =0,62 ÷ 0,65, т.к. это приводит к уменьшению магнитной индукции в

---

* Относительная длина Λ представляет собой отношение активной длины l_δ к диаметру расточки статора D, т.е. $\Lambda = \frac{l_\delta}{D}$.

воздушном зазоре [44]. По этой причине бесконтактные электродвигатели по сравнению с асинхронными электродвигателями той же мощности имеют больший диаметр D и меньшую длину ℓ_δ

При конструировании магнитопроводов бесконтактных машин рассматриваемого типа обычно стремятся выполнить их таким образом, чтобы магнитная индукция во всех сечениях была примерно одинаковой. В [9] показано, что в этом случае магнитопроводы получаются наиболее экономичными.

Для электродвигателей предпочтительной является конструкция ротора с трапецеидальными наконечниками полюсов, которая позволяет существенно уменьшить магнитные потоки рассеяния и улучшить к.п.д. машины [96].

Способ размещения катушек обмотки возбуждения на неподвижных частях машины (см. рис. I - 3) зависит от конкретных целей, поставленных перед разработчиком. Например, катушки обмотки возбуждения, размещенные под лобовыми частями обмотки, наиболее экономичны в отношении обмоточного провода; при размещении их над лобовыми частями облегчается сборка и разборка машины; если разместить катушки в углублениях подшипниковых щитов, улучшается их тепловой режим и т.д.

Питание обмотки возбуждения (ОВ) может осуществляться от дополнительной обмотки статора через выпрямительный блок (машины опытной серии СО [28], рис. 5). Основной недостаток этой схемы заключается в некотором уменьшении тока возбуждения при увеличении нагрузки.

Питание ОВ может быть осуществлено также непосредственно от сети через понижающий трансформатор и выпрямительный блок (машины серии СДБ, [I04], рис. 6 - 8).

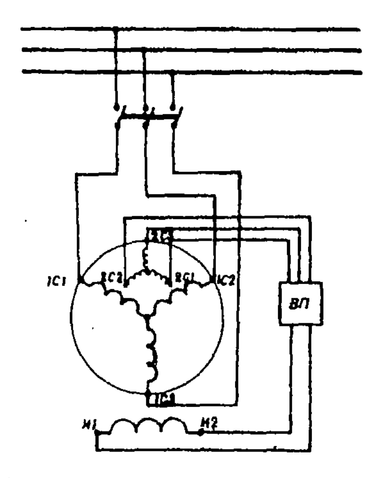


Рис. 5. Схема бесконтактного синхронного электродвигателя СО основного исполнения: IC_{I-3} - главная обмотка статора; $2C_{I-3}$ - дополнительная обмотка статора; $И_{I,2}$ - обмотка возбуждения; ВП - выпрямитель возбуждения и пусковая автоматика системы возбуждения.

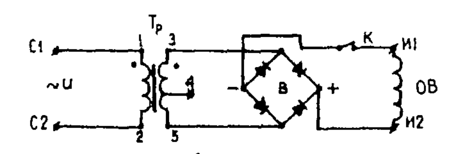


Рис. 6. Принципиальная схема питания обмотки возбуждения электродвигателя унифицированной серии СДБ : CI - C2 - зажимы статорной обмотки; I - 2 - первичная обмотка трансформатора Тр; 3 - 5 - вторичная обмотка трансформатора Тр с дополнительным отводом 4 ; В - выпрямитель; К - выключатель; ОВ - обмотка возбуждения.

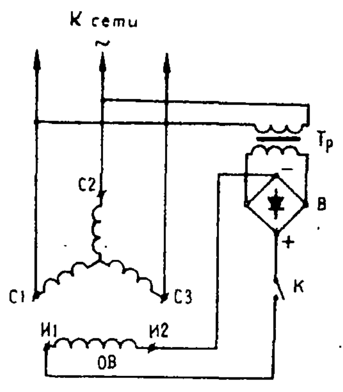


Рис. 7. Принципиальная схема бесконтактного электродвигателя унифицированной серии СДБ основного исполнения: СI, С2, С3 – зажимы обмотки статора; ИI – И2 – зажимы обмотки возбуждения; Тр, К, В – элементы схемы питания обмотки возбуждения (см. рис. 6).

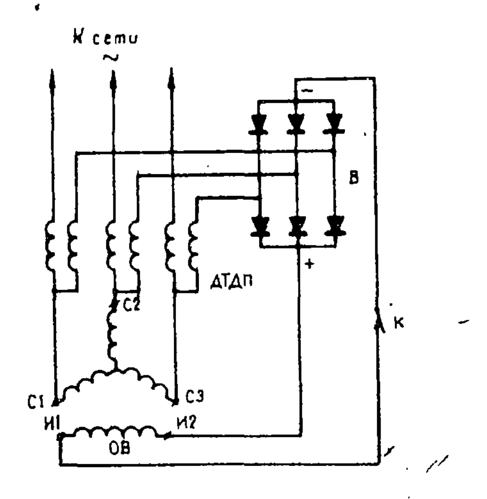


Рис. 8. Принципиальная схема компаундирования электродвигателя унифицированной серии СДБ: ДТДП – двухобмоточные трансформаторы двойного питания; СI, С2, С3 – зажимы обмотки статора; ИI – И2 – зажимы обмотки возбуждения; В – трехфазный выпрямитель; К – выключатель.

3. Электромагнитный расчет

Как известно, в настоящее время электромагнитный расчет обычных синхронных машин производится в соответствии с методиками, изложенными в [12, 14, 81].

При расчете бесконтактных синхронных машин необходимо учитывать их характерные особенности: наличие внешнего магнитопровода, сложной полюсной системы ротора, определяющей повышенные потоки рассеяния, и т.д.

Эти вопросы рассматривались в работах [3, 7, 22 - 24, 34, 46, 52, 65] и других, которые также должны использоваться при расчете.

Общим неудобством расчета по известным методикам является то, что основные энергетические параметры машин выясняются только в конце расчета. Например, при получении в конце расчета к.п.д., не соответствующего величине, принятой в начале расчета, необходимо повторить заново весь расчет машины.

В изложенной ниже методике, представляющей собой развернутый формуляр электромагнитного расчета, использованы основные положения методик [12, 14, 81], введены новые разделы и пункты расчета в соответствии с данными, приведенными в работах, которые упомянуты в списке литературы. Изменена последовательность определения или расчета некоторых величин: после определения номинальных величин и размеров сердечника статора рассчитываются активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки статора; проверяется правильность выбора в начале расчета коэффициента K_E, характеризующего изменение магнитного потока статора при нагрузке машины.

Если расчетное значение K_E существенно отличается от принятой ранее величины, то небольшой по объему расчет повторяется с учетом полученной величины K_E. Затем рассчитываются м.д.с. статора с учетом реальных магнитных нагрузок и определяется коэффициент насыщения активной стали статора при номинальной нагрузке машины. По этим величинам магнитных индукций в расчетных сечениях магнитопровода статора и воздушном зазоре находится величина отдельных потерь и коэффициент полезного действия без учета потерь на возбуждение, а затем по величине последнего производится корректировка небольшого по объему, выполненного ранее расчета. Далее рассчитывается величина угла рассогласования между вектором напряжения сети и вектором E_0 (осью полюсов ротора), которая используется для определения м.д.с. возбуждения машины, и окончательно определяется величина к.п.д. с учетом потерь на возбуждение.

Номинальные данные, являющиеся основными исходными величинами для электромагнитного расчета:

Мощность номинальная . . . . $P_н$, квт
Число фаз . . . . m_1
Напряжение сети (линейное) . . . . $U_л$, в
Частота сети . . . . f_1, гц
Скорость вращения синхронная . . . . n, об/мин
Коэффициент мощности . . . . $\cos\varphi$
Соединение фаз обмотки статора . . . . Y или Δ

Ниже приводятся основные разделы электромагнитного расчета и формулы для определения расчетных величин. Даются также пояснения о выборе тех или иных параметров, входящих в

формулы, и ссылки на работы, в которых имеются необходимые данные.

Номинальные величины и главные размеры:

1. Число пар полюсов - p :

$$p = \frac{60 f_1}{n} .$$

2. Фазовый ток статора - I_1 , а :

$$I_1 = \frac{P_H \cdot 10^3}{\eta \cos\varphi \sqrt{3}\, U_л} .$$

Опыт расчета и постройки бесконтактных синхронных двигателей показывает, что величины их к.п.д. получаются примерно одинаковыми с величинами к.п.д. асинхронных двигателей соответствующей мощности. Это позволяет использовать для предварительного выбора к.п.д. рассматриваемых машин соответствующие данные по асинхронным двигателям (например, [81], табл. 13-2а).

В случае отсутствия оговоренных в задании требований к величине коэффициента мощности его величина принимается равной $\cos\varphi = 1$, так как при этом достигается наиболее экономичный режим работы электродвигателей малой мощности.

3. Расчетная мощность - P' , ква:

$$P' = \frac{K_E P_H}{\eta \cos\varphi} ,$$

где K_E предварительно определяется по графику рис. 9, построенному по экспериментальным и расчетным данным электродвигателей малой мощности.

4. Внутренний диаметр расточки статора - D , м:

$$D = K_н \cdot 0{,}39 \sqrt[3]{\frac{C_A \cdot P'}{\Lambda \cdot n}}.$$

В целях снижения себестоимости и сокращения сроков изготовления отдельных образцов бесконтактных синхронных машин часто используются листы статора серийных асинхронных машин. Например, в спроектированных машинах опытной серии СО, унифицированной серии СДБ использованы листы статоров асинхронных двигателей единой серии АО2.

Как было отмечено выше, наиболее полное использование активных материалов в синхронном электродвигателе достигается при $\Lambda \leq 0{,}65$, что требует выполнения машин с бо́льшим наружным диаметром, чем габарит соответствующего по мощности асинхронного двигателя. Например, машины СО и СДБ имеют пакет статора на один габарит выше соответствующих по мощности асинхронных двигателей.

Это обстоятельство при определении диаметра D учитывается коэффициентом $K_н$. В случае использования листов двигателей АО2 $K_н \approx 1{,}15$.

Постоянная Арнольда при этом может быть определена по рис. IO.

5. Наружный диаметр пакета статора - D_a , м.

Приближенно определяется в зависимости от числа полюсов 2р по формулам I3-9 [8I] и уточняется, например, по таблице I-I [8I].

6. Число пазов на полюс и фазу - q_1 .

Выбирается в соответствии с разделом I3-4 [8I].

7. Число пазов статора - Z_1 :

$$Z_1 = 2m_1 \cdot p \cdot q_1 .$$

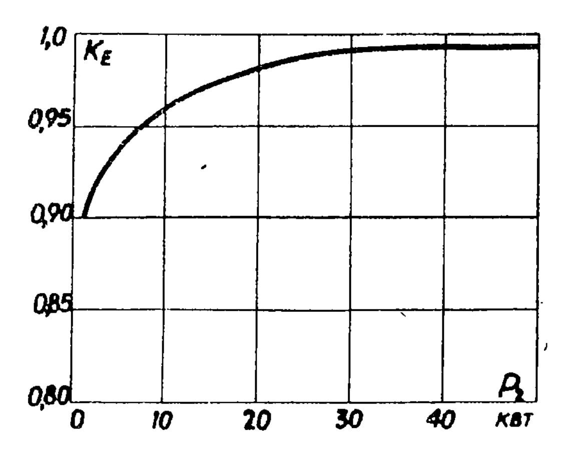


Рис. 9. Величина коэффициента K_E в зависимости от полезной мощности на валу электродвигателя P_2 [97] .

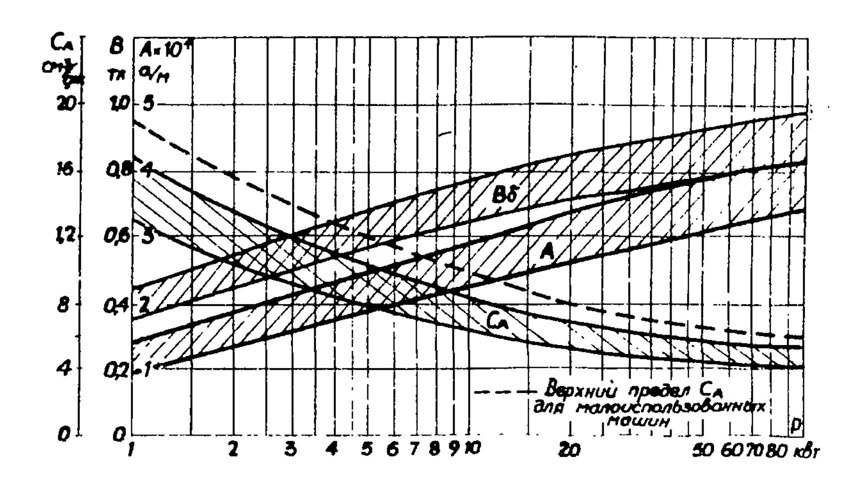


Рис. I0. Зависимость электромагнитных нагрузок и постоянной Арнольда от расчетной мощности асинхронной машины (по данным [95]).

8. Полюсное деление, выраженное количеством пазов статора – τ_n :

$$\tau_n = \frac{Z_1}{2p} .$$

9. Полюсное деление статора – τ , м:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} .$$

10. Зубцовое деление статора – t_{z1} , м:

$$t_{z1} = \frac{\pi D}{Z_1} .$$

11. Главный воздушный зазор – δ_1 , м.

На основании опыта проектирования рекомендуется принимать в соответствии с мощностью машины:

$\delta_1 = (0{,}5 \div 0{,}9)10^{-3}$ для машины 1,5 ÷ 10 квт;

$\delta_1 = (0{,}9 \div 1{,}7)10^{-3}$ для машины 10 ÷ 20 квт;

$\delta_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ и выше для машин более 40квт.

12. Шаг обмотки по пазам – y_n :

$$y_n = \frac{Z_1}{2p} \mp \varepsilon ,$$

где ε – укорочение обмотки, берется таким, чтобы y_n было целым числом.

13. Коэффициент укорочения шага – β_1 :

$$\beta_1 = \frac{y_n}{\tau_n} .$$

β_1 находится в пределах

для $2p = 4$ и 6 – $0{,}78 \div 0{,}89$;

для $2p = 2$ может падать до 0,61.

14. Коэффициент скоса пазов для основной волны - $K_{ск}$ [12]. Рекомендуется применять скос пазов статора на одно пазовое деление статора для машин с массивными полюсами и беличьей клеткой на роторе, поскольку это позволяет уменьшить зависимость величины пускового момента от начального пространственного положения ротора.

15. Обмоточный коэффициент основной волны для симметричных обмоток при наличии укорочения шага и скоса пазов $-K_{w1}$[12].

Так как электродвигатели выполняются с целым числом пазов на полюс и фазу, имеют шестизонную обмотку (60-градусная зона), обмоточный коэффициент рассчитывается по формуле

$$K_{w1} = \frac{0{,}5}{q_1 \sin 30°/q_1} \sin\left(\beta_1 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot K_{ск} .$$

16. Коэффициент полюсного перекрытия - α_p .

Для машин с роторами, имеющими трапецеидальные наконечники полюсов, обычно принимают среднее значение:

$$\alpha_p = 0{,}6 \div 0{,}7 .$$

Для машин с прямоугольными наконечниками полюсов обычно

$$\alpha_p = 0{,}7 \div 0{,}8 .$$

17. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия $-\alpha_\delta$ и коэффициент формы кривой - K_B .

Определяются по рис. 6-7 [81] в зависимости от величин α_p и δ_1/τ .

18. Индукция в главном воздушном зазоре - $B_{\delta 1}$, тл и линейная нагрузка A_1 a/м.

Предварительно определяются по рис. I0 в зависимости от мощности машины – P.

I9. Расчетная длина статора – ℓ_δ, м:

$$\ell_\delta = \frac{0{,}61 \cdot P' \cdot 10^4}{\alpha_\delta \cdot K_B \cdot K_{W1} \cdot B_{\delta 1} \cdot A \cdot D^2 \cdot n}.$$

20. Магнитный поток полюса – Ф, вб:

$$\Phi = \alpha_\delta \cdot \tau \cdot \ell_\delta \cdot B_{\delta 1}.$$

2I. Число витков в фазе – W_1:

$$W_1 = \frac{K_E \cdot U_1}{4 \cdot K_B \cdot K_{W1} \cdot f_1 \cdot \Phi}.$$

22. Число витков в секции – W_c:

$$W_c = \frac{m_1 W_1}{Z_1}.$$

23. Уточнение величины линейной нагрузки – A, а/м:

$$A = \frac{I_1 \cdot 6 \cdot W_1}{\pi \cdot D}.$$

24. Уточнение магнитной индукции – $B_{\delta 1}$, тл:

$$B_{\delta 1} = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \cdot \tau \cdot \ell_\delta}.$$

25. Форма паза и основные его размеры.

Выбираем паз по рис. II.

26. Конструкция изоляции и изоляционные материалы статорных обмоток.

Выбираются, например, в соответствии с [80] или [8I].

27. Площадь паза за вычетом пазовой изоляции и площади клина – S'_n, м^2.

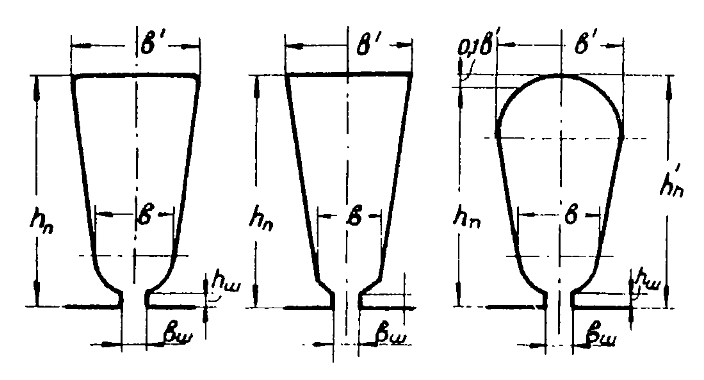


Рис. II. Конфигурации пазов статора.

28. Плотность тока в статорной обмотке - Δ_a , а/м^2.

Плотность тока в статорной обмотке ориентировочно можно принять $\Delta_a = (3,8 \div 5,8)10^6$, а/м^2. Бо́льшие значения относятся к машинам с бо́льшим главным воздушным зазором и катушками возбуждения, сравнительно удаленными в аксиальном направлении от лобовых частей статорной обмотки.

29. Сечение проводника фазы статора - S_a , м^2:

$$S_a = I_1/\Delta_a .$$

30. Марка провода обмотки статора и его размеры:

$$\frac{\text{диаметр без изоляции}}{\text{диаметр с изоляцией}} = \frac{d}{d_{из}}, \text{ сечение } S_a .$$

Марка провода в зависимости от класса нагревостойкости обмоток проектируемой машины выбирается по таблицам 4, 5, приведенным, например, в [8I, 92].

Диаметр провода и сечение, близкое к расчетному, выбираются по таблице IУ-I [8I] с учетом ранее выбранной

марки провода.

3I. Коэффициент заполнения паза – $K_з$.

Обычно $K_з$ находят в соответствии с выражением

$$K_з = \frac{2 \cdot a_1 \cdot W_c \cdot d_{uз}^2}{S_п}.$$

Увеличение $K_з$ является одним из средств повышения использования активной части электродвигателей. В настоящее время при ручной укладке катушек всыпных обмоток в пазы практически достигается $K_з$ порядка 0,72 ÷ 0,73. Некоторые зарубежные фирмы (например,"Шорх", ФРГ) при ручной укладке достигают значения $K_з$ до 0,85 [I02].

32. Средняя длина обмотки статора – $\ell_{ср}$, м:

$$\ell_{ср} = 2\,(\ell_б + \ell_{л1}),$$

где $\ell_{л1}$ – средняя длина лобовой части , м;

для обмоток с мягкими секциями.

$$\ell_{л1} = K_{л1} \cdot \tau_у + 2B,$$

для обмоток с жесткими секциями

$$\ell_{л1} = K_{л1} \cdot \tau_у + 2B + h_п.$$

В этих формулах

$\tau_у$ – средняя ширина секции, которая рассчитывается по формуле

$$\tau_у = \beta_1 \, \frac{\pi\,(D + h_п)}{2p}, \text{ м}.$$

Коэффициент $K_{л1}$ и величина B определяются по таблице 4-I2 [8I] .

33. Длина вылета лобовых частей обмотки статора – $\ell_в$,м:

$$\ell_в = K_{в1} \cdot \tau_y + B ,$$

где коэффициент $K_{в1}$ и величина B определяются по табл. 4-I2 [8I].

34. Длина обмотки фазы статора – $L_ф$, м:

$$L_ф = \ell_{cp} \cdot W_1 .$$

35. Сопротивление фазы статора постоянному току при расчетной температуре , ом:

$$r_1 = \frac{L_ф}{\gamma \cdot a_1 \cdot S_a} ,$$

где a_1 – число параллельных проводов в фазе ;

γ – удельная проводимость, м/ом·мм^2, принимается в зависимости от расчетной температуры из табл. 2 [I2].

Таблица 2

Материал обмотки	Расчетная температура, ^{0}K (^{0}C)		
	293 (20)	348 (75)	388 (II5)
Медь	56.I0^6	46.I0^6	4I.I0^6
Алюминий	34.I0^6	28.I0^6	25.I0^6

Для машин, превышения температуры обмоток которых соответствуют классам изоляции A, E, B, применяют расчетную температуру 348^{0}K (75^{0}C); для машин с превышениями температур обмоток, соответствующими классам F , H, – 388^{0}K (II5^{0}C).

36. Коэффициент проводимости пазового рассеяния обмотки статора – $\lambda_{п1}$.

Коэффициент проводимости пазового рассеяния определяется в соответствии с конфигурацией выбранного ранее паза.

На рис. I2 приведены наиболее часто употребляемые формы полузакрытых пазов.

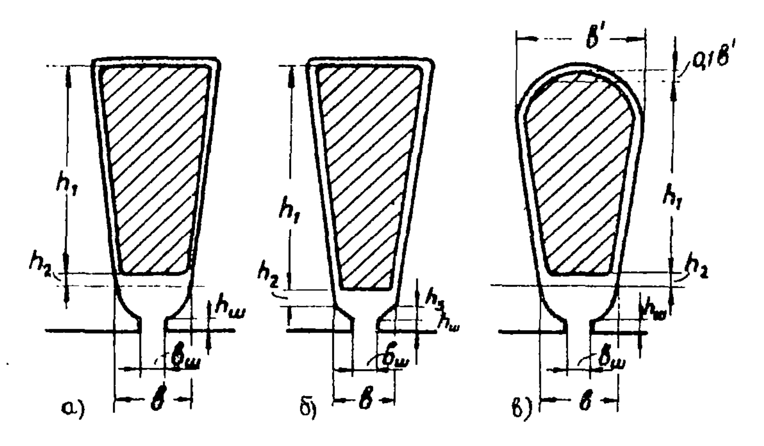


Рис. I2. К расчету пазового рассеяния.

Для трапецеидальных пазов значения λ_{n1} определяются по формулам [8I] :

I) полукруглая часть у открытия паза(рис. I2, а, в)

$$\lambda_{n1}=\frac{h_1}{3b}K_\beta+\left(0{,}785-\frac{b_ш}{2b}+\frac{h_2}{b}+\frac{h_ш}{b_ш}\right)\cdot K'_\beta\ ;$$

2) трапецеидальная часть у открытия паза(рис. I2, б)

$$\lambda_{n1}=\frac{h_1}{3b}K_\beta+\left(\frac{h_2}{b}+\frac{3h_3}{b+2b_ш}+\frac{h_ш}{b_ш}\right)\cdot K'_\beta\ ,$$

где K_β и K'_β определяются по рис. 7,3 [8I] в зависимости от коэффициента сокращения шага β_1 .

37. Коэффициент воздушного зазора - K_{δ_1} :

$$K_{\delta_1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma \cdot \delta_1},$$

где

$$\gamma = \frac{(b_ш/\delta_1)^2}{5 + b_ш/\delta_1}.$$

38. Проводимость дифференциального рассеяния - λ_{g1} [81]:

$$\lambda_{g1} = 0{,}9 \frac{t_{z1} (q_1 K_{w1})^2 \cdot K_{ш1}}{\delta_1 \cdot K_{\delta_1}} \sigma_{g1} \cdot K_{cg},$$

где

$$K_{ш1} = 1 - 0{,}033\, b_ш^2/t_{z1} \cdot \delta_1;$$

σ_{g1} определяется по рис. 7.16 в зависимости от величины коэффициента β [81];

K_{cg} = 0,85 ÷ 0,95 - коэффициент, который учитывает неравномерность воздушного зазора явнополюсной синхронной машины.

39. Проводимость рассеяния лобовых частей - $\lambda_{л1}$ [100]:

$$\lambda_{л1} = 0{,}955 \frac{q_1 \cdot K_p^2 \cdot \tau_л \cdot K_л \cdot K_{лб}}{l_\delta},$$

где

$K_p = \frac{0{,}5}{q_1 \sin 30°/q_1}$ - коэффициент распределения обмотки статора;

$\tau_л = \frac{\pi \cdot D_л}{2p}$ - полюсное деление по среднему диаметру лобовых частей $D_л$, м;

$K_л = \frac{0{,}5 \cdot l_{л1}}{2 l_в \sqrt{1 + \frac{\beta_1 \tau_л}{2 l_в}}}$ - коэффициент, учитывающий влияние идеализации лобовых частей обмотки статора на величину лобового

рассеяния;

$K_{\lambda\delta}$ = I,04 ÷ I,I – коэффициент, учитывающий увеличение магнитной проводимости лобовых частей обмотки статора за счет потоков рассеяния по пути массивных ферромагнитных подшипниковых щитов и станины.

40. Суммарная проводимость – $\Sigma\lambda$:

$$\Sigma\lambda = \lambda_{п1} + \lambda_{g1} + \lambda_{л1} .$$

4I. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора – x_1 , ом:

$$x_1 = 0{,}158 \cdot f_1 \left(\frac{W_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{p \cdot q_1} \Sigma\lambda .$$

42. Полное сопротивление обмотки статора – Z_1 , ом:

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} .$$

43. Величина внутреннего напряжения электродвигателя – U_μ в [I00]:

$$U_\mu = \sqrt{U_1^2 + (I_1 Z_1)^2 - 2U_1 \cdot I_1 \cdot \frac{r_1(1-tg^2\varphi_1/2) - x_1 2tg\,\varphi_1/2}{1+tg^2\varphi_1/2}} ,$$

где φ_1 – фазовый угол тока – I_I , град;

U_1 – напряжение фазы обмотки статора, в.

44. Величина коэффициента – K_E:

$$K_E = U_\mu / U_1 .$$

Если K_E существенно отличается от ранее принятой величины, производится необходимая корректировка выполненного расчета.

М а г н и т н а я   ц е п ь   с т а т о р а

45. М.д.с. главного воздушного зазора – F_δ , а:

$$F_\delta = 1{,}6 \cdot K_{\delta 1} \cdot \delta_1 \cdot B_{\delta 1} \cdot 10^6.$$

46. Ширина зубца статора – b_{z1} , м (рис. II):

$$b_{z1} = \frac{\pi(D + 2h_n)}{Z_1} - b' \qquad \text{(рис. II,а,б)};$$

$$b_{z1} = \frac{\pi(D + 2h_n - b')}{Z_1} - b' \qquad \text{(рис. II, в)}.$$

47. Индукция в зубцах статора – B_{z1} , тл:

$$B_{z1} = \frac{t_{z1} \cdot B_{\delta 1}}{b_{z1} \cdot K_c},$$

где K_c – коэффициент заполнения пакета, определяется по таблице 2-4 [8I] в зависимости от толщины и изоляции электротехнической стали.

48. М.д.с. зубцов статора – F_{z1} , а :

$$F_{z1} = 2h_n \cdot H_z$$

(H_z находим в зависимости от марки электротехнической стали, например, по таблицам П-I, П-3 [8I].

49. Высота спинки статора – h_{a1} , м:

$$h_{a1} = \frac{D_a - D - 2h_n}{2}.$$

50. Индукция в спинке статора – B_{a1} , тл.

51. Средняя длина магнитных линий в спинке статора $- L_1$, м:

$$L_1 = \frac{\pi (D_a - h_a)}{2p}.$$

52. М.д.с. спинки статора $- F_{a1}$, а:

$$F_{a1} = \xi \cdot H_{a1} \cdot L_1,$$

где ξ - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитной индукции в спинке статора и определяемый по рис. 6.17 в соответствии с величиной магнитной индукции B_a [81].

53. М.д.с. холостого хода $- F_{NS}$, а:

$$F_{NS} = F_\delta + F_{z1} + F_{a1}.$$

54. Коэффициент насыщения пакета статора $- K_\mu$:

$$K_\mu = \frac{F_{NS}}{F_\delta}.$$

55. Величина угла $- \beta (\angle \dot{U}_1 o \dot{U}_\mu)$, град [99]:

$$\beta = \arccos \frac{U_1^2 + U_\mu^2 - (I_1 Z_1)^2}{2 U_1 U_\mu}.$$

56. Намагничивающий ток статора $- I_\mu$, а [99]:

$$I_\mu = 0{,}474 \frac{p F_{NS}}{W_1 f_{w1}}.$$

К. п. д. без учета потерь на возбуждение

57. Потери в меди обмотки статора $- P_{M1}$, квт:

$$P_{M1} = m_1 I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}.$$

58. Потери в стали ярма статора – P_{cc} , квт:

$$P_{cc} = 1{,}6 \cdot P'_{cc} G_{a1} \cdot 10^{-3},$$

где G_{a1} – вес ярма статора, находим по формуле

$$G_{a1} = h_{a1} \cdot \ell_\delta \cdot K_c \cdot Z_1 \cdot 2p \cdot \gamma_c, \text{ кг};$$

γ_c – удельный вес электротехнической стали, определнем по таблице 2-I [8I] ;

P_{co} – удельные потери листовой электротехнической стали, вт/кг, определяются по таблице Ш-I в зависимости от величины магнитной индукции B_{a1} , тл [8I].

59. Потери в зубцах статора – P_{cz} , квт:

$$P_{cz} = 1{,}8\, P'_{cz} \cdot G_{z1} \cdot 10^{-3},$$

где P'_{cz} – удельные потери в листовой электротехнической стали, вт/кг, определяются по таблице Ш-I в зависимости от величины магнитной индукции B_{z1} , тл [8I] ;

G_{z1} – вес зубцов статора, рассчитывается по формуле

$$G_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot \ell_\delta \cdot K_c \cdot Z_1 \cdot \gamma_c, \text{ кг}.$$

60. Потери в пакете статора от основного магнитного поля – P_{c1} , квт:

$$P_{c1} = P_{cc} + P_{cz}.$$

6I. Механические потери – $P_{мх}$, квт:

$$P_{мх} \approx 0{,}8 \cdot 2p \left(\frac{U}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{\frac{\ell_1}{0{,}19}},$$

где $$U = \frac{\pi (D - 2\delta_1) \cdot n}{60}, \text{ м/сек};$$

ℓ_1 - длина пакета статора.

62. Магнитная индукция третьей гармоники - B_3:

$$B_3 = \sqrt{(B_{f3} - B_{d3})^2 + B_{q3}^2},$$

где B_{d3} и B_{q3} - магнитные индукции третьей гармоники соответственно по продольной и поперечной осям:

$$B_{d3} = B_{d3}^* \cdot B_{\delta 1} \quad \text{и} \quad B_{q3}^* = B_{q3} \cdot B_{\delta 1}.$$

Значения B_{d3}^* и B_{q3}^* определяются по кривым рис. 14, 15 в соответствии с величинами коэффициента полюсного перекрытия α_p и отношения δ_1/τ [81] ;

B_{f3} - магнитная индукция третьей гармоники поля полюсов:

$$B_{f3} = (0{,}6 - B_{f3}^*) \cdot B_{\delta 1};$$

B_{f3}^* определяется по рис. 16 в соответствии с величинами α_p и δ_1/τ [1].

63. Добавочные потери в зубцах статора при к.з. и f_1 = = 50 гц - P_{Z3}, квт :

$$P_{Z3} \approx 10{,}7 \cdot P_{10/50} \cdot B_3^{5/4} \cdot G_{Z1} \cdot 10^{-3},$$

где $P_{10/50}$ - удельные потери при максимальной индукции 1,0 тл, при синусоидальном ее изменении во времени при частоте перемагничивания 50 гц определяем по таблице Ш-1 [81].

64. Добавочные потери на поверхности ротора при холостом ходе, вызванные зубчатостью статора, – $P_{пов}$, квт [81] :

$$P_{пов} = 2p \cdot \tau \cdot \alpha_p \cdot l_p \cdot P'_{пов} \cdot 10^{-3},$$

где

$$P_{пов} = 23,3 \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10.000}\right)^{1,5} (B_0 \cdot t_{z1})^2 \cdot 10^6 \ вт/м^2,$$

$$B_0 = \beta_0 \cdot K_{\delta 1} \cdot B_{\delta 1},$$

β_0 определяется по рис. 8.4, в соответствии с величиной отношения $в_ш/\delta_1$ [81].

65. Добавочные потери на поверхности ротора от высших гармоник – P_{VR}, квт [14]:

$$P_{VR} = 1,4 \cdot 4,5 \cdot 10^{-7} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,5} \frac{A^2 \cdot \tau^4 \cdot S_R}{100\,\delta_1^2} \varphi(\beta_1),$$

где

S_R – активная поверхность полюсов ротора, $м^2$:

$$S_R = \pi (D - 2\delta_1) \cdot l_\delta \cdot \alpha_p, \ м^2;$$

$\varphi(\beta_1)$ определяется по рис. 13 в соответствии с величиной коэффициента укорочения шага β_1.

66. Добавочные потери от зубцовых полей статора на поверхности ротора – P_{VZR}, квт [14] :

$$P_{VZR} = 1,4 \cdot 1,14 \frac{A^2 \cdot t_{z1}^4 \cdot K_{W1}^2 \left(\frac{Z_1}{p}\right)^{1,5} \cdot K_Э^2 \cdot S_R}{100 \cdot \delta_1^2},$$

где

$$K_Э^2 = \left(\frac{\alpha_V}{Sh\,\alpha_V}\right)^2;$$

$$\alpha_V = \frac{\pi \delta_1}{\tau} \cdot \frac{Z_1}{p}.$$

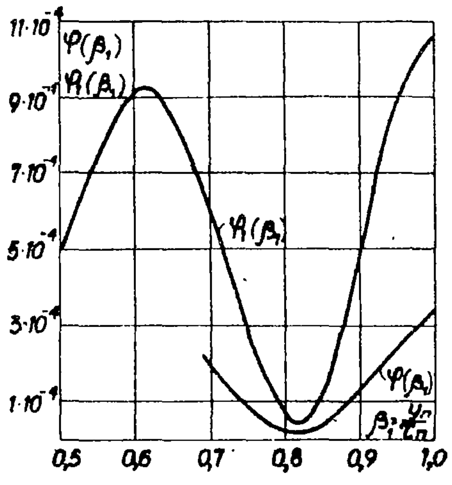


Рис. I3. Зависимость величин $\varphi_1(\beta_1)$ и $\varphi(\beta_1)$ от коэффициента β_1 .

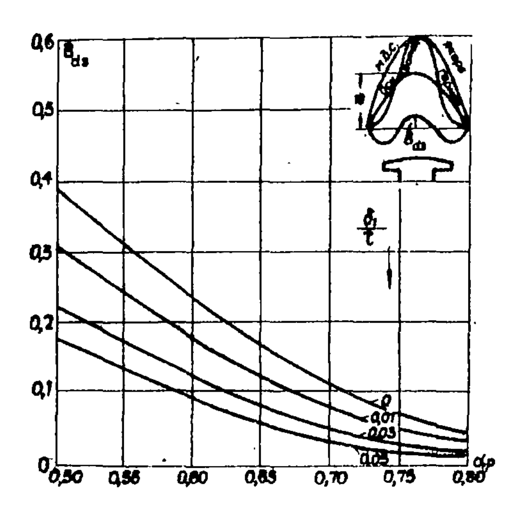


Рис. I4. Зависимость величины B_{d3} от коэффициента α_p и отношения δ_1/τ .

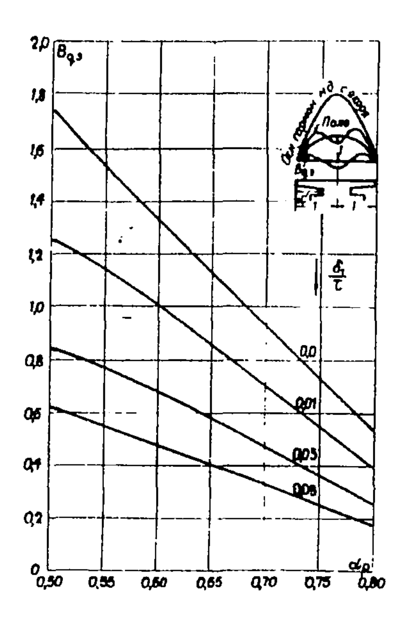


Рис. I5. Зависимость величин B_{q3} от коэффициента α_p и отношения δ_1/τ

67. Суммарные добавочные потери на поверхности ротора - $P_{доб2}$, квт:

$$P_{доб2} = P_{пов} + P_{VR} + P_{VZR}.$$

68. Добавочные потери на корпусе машины при холостом ходе - $P_{K(xx)}$ [70, 90]:

$$P_{K(xx)} = 0{,}075 \cdot p \cdot \left(\frac{\tau_a}{0{,}1}\right)\left(\frac{\ell_1}{0{,}1}\right)\sqrt{\frac{f_1}{50}}\ H^2_{km} \times \left(1 + \frac{2\tau_a}{\pi \cdot \ell_1}\right) \cdot 10^{-7}\ кВт,$$

где

$$\tau_a = \frac{\pi D_a}{2p}, \qquad и ;$$

$H_{кт}$ находим по таблице П-5 для B_{a1} [81].

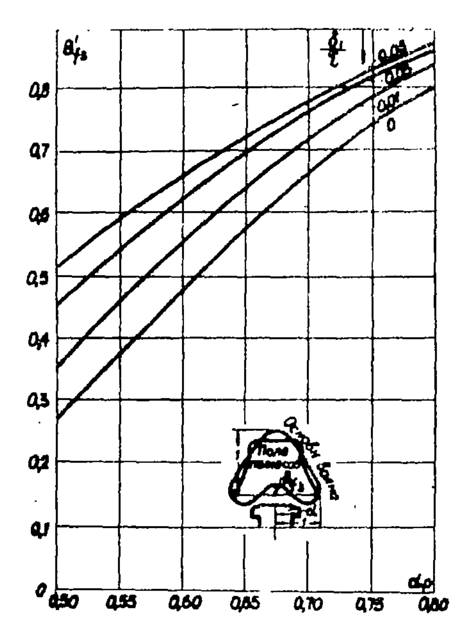


Рис. 16. Зависимость величины B'_{f3} от коэффициента α_p и отношения δ_1/τ

69. Добавочные потери на поверхности щитов и корпуса при к.з. [70, 90]:

$$P_{(щ+к)} = 5p\left(\frac{\tau}{0,1}\right)^4\left(\frac{A}{10^4}\right)^2\left(\frac{f_1}{500}\right)^{1,5}\left(\frac{2\cdot 10^5}{\rho_к}\right)^{0,5}10^{-3}\ кВт.$$

70. Суммарные потери в машине без учета потерь на возбуждение - Σp :

$$\Sigma p = P_{c1} + P_{доб2} + P_{z3} + P_{MX} + P_{M1} + P_{K(XX)}\ P(щ+к).$$

71. Коэффициент полезного действия без учета потерь на возбуждение – η, %:

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100}{P_2 + \Sigma p}.$$

Если η существенно отличается от ранее принятой величины, производится необходимая корректировка выполненного расчета.

Полюса и внешний магнитопровод

72. Расчет угла потерь в пакете статора– $\delta_{\mu c}$ [97]:

$$\delta_{\mu c} = \operatorname{arctg} \ r'_{\mu c}/x'_{\mu c},$$

где параметры $r'_{\mu c}$ и $x'_{\mu c}$ определяются по формуле

$$Z'_{\mu c} = r'_{\mu c} + j x'_{\mu c} = j \frac{r''_{\mu c} \cdot x''_{\mu c}}{r''_{\mu c} + j x''_{\mu c}},$$

$r''_{\mu c}$ – активное сопротивление :

$$r''_{\mu c} = \frac{m_1 \cdot U_\mu^2}{P_{c1}} 10^{-3} \text{ ом};$$

$x''_{\mu c}$ – индуктивное сопротивление взаимоиндукции :

$$x''_{\mu c} = U_\mu / I_\mu \text{ ом}.$$

73. Величина полного тока возбуждения статора – I'_2, а [99], (рис. 17):

$$I_2' = \sqrt{I_1^2 + I_\mu^2 + 2 I_1 \cdot I_\mu \sin(\beta - \delta_{\mu c})}.$$

74. Величина угла θ_1', град [77] :

$$\theta_1' = \frac{(P_2 + P_{мх} + P_{доб2}) \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_\mu \cdot I_2'}.$$

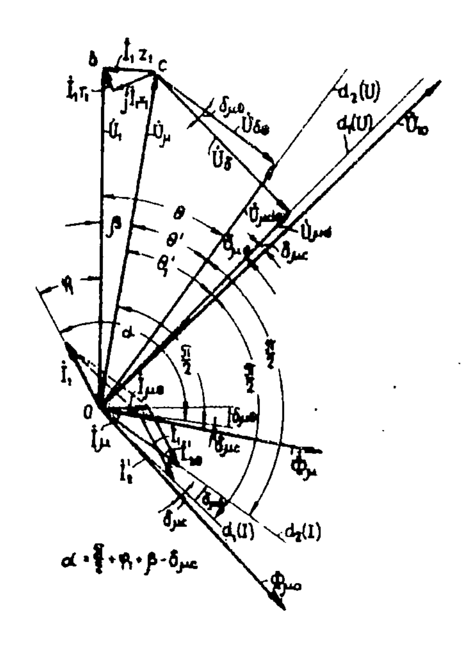


Рис. I7. Совмещенная векторная диаграмма синхронных электродвигателей неявнополюсного и явнополюсного исполнения.

75. Величина коэффициента K_d' с учетом дополнительных воздушных зазоров и междуполюсного рассеяния :

$$K_d' = \frac{K_d}{1 + K_f\, R_{\delta g} / R_\delta},$$

где K_d определяется по рис. I8 в соответствии с α_p и δ_1/a [54];

a - расстояние между полюсами разной полярности (рис.I9) ;

K_f определяется по рис. 20 в соответствии с α_p и δ_1/a [54];

$R_{\delta g} = \frac{R_\delta \cdot R_g}{R_\delta + R_g}$ - результирующее магнитное сопротивление индуктора ротора, I/ом сек ;

$R_\delta = \frac{1}{\mu_0 \lambda_\delta D_p}$ - магнитное сопротивление междуполюсного пространства, I/ом сек ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ - магнитная проницаемость воздуха, гн/м ;

λ_δ - удельная магнитная проводимость междуполюсного пространства машины с числом пар полюсов р = 2 , 3, предварительно определяется по рис. 2I [38] ; уточненная величина λ_δ может быть определена по методике, изложенной в [75] .

Для двухполюсных машин значение λ_δ можно рассчитывать по формуле

$$\lambda_\delta = \frac{S_{вп}}{a_1 \cdot D} ,$$

где $S_{вп}$ - площадь поверхности полюса, обращенной в сторону полюса противоположной полярности (рис.22) ;

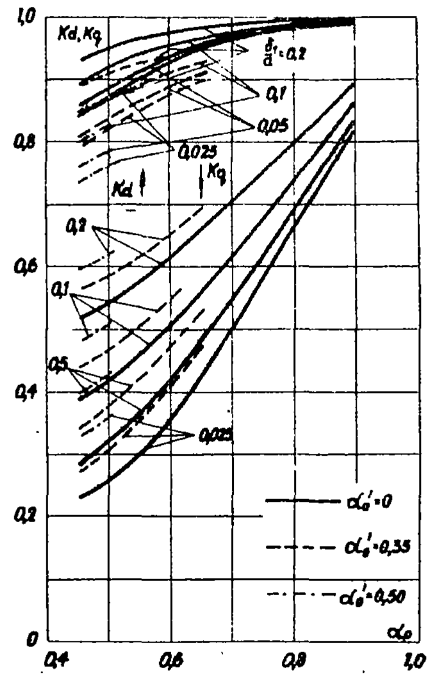


Рис. I8. Зависимость величин K_d и K_q от коэффициента α_p для прямых ($\alpha_0' = 0$), трапецеидальных ($\alpha_0' = 0,35$) и треугольных ($\alpha_0' = 0,5$) полюсов.

a_1 - расстояние между внутренними плоскостями $S_{вп}$ разноименных полюсов.

$D_p = D - 2\delta_1$ - диаметр ротора, м ;

$R_g = \frac{2p\,\delta_g}{\mu_0 \cdot \pi \cdot D_g \cdot L_g}$ - магнитное сопротивление дополнительных воздушных зазоров, I/ом сек [99, IOI];

D_g, L_g, δ_g – соответственно диаметр, длина цилиндрической поверхности ротора в зоне дополнительного воздушного зазора и величина дополнительного воздушного зазора ;

$R_\delta = \frac{2pK\delta_1 \delta_1}{\mu_0 K_d D \ell_\delta}$ – магнитное сопротивление основного воздушного зазора, I/ом сек [99].

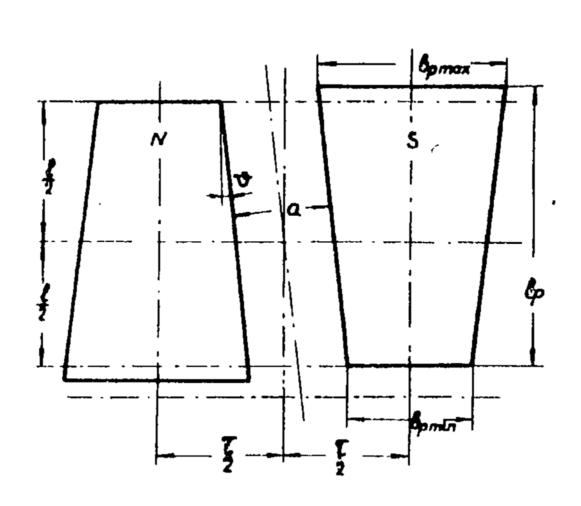


Рис. I9. К определению коэффициентов K_d и K_q.

76. Величина отношения K_d'/K_q ,

где K_q находится по рис. I8.

77. Величина $\varkappa_{dq} \cdot K_d'/K_q$,

где $\varkappa_{dq}$ находится по рис. 23.

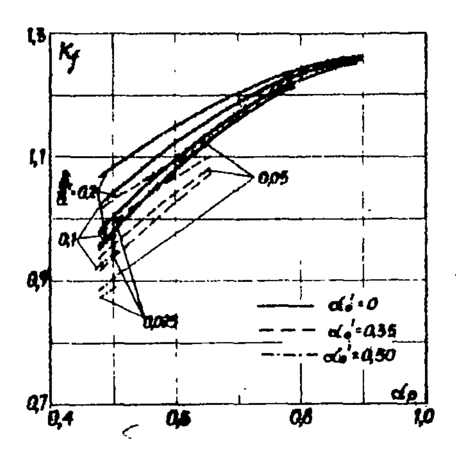
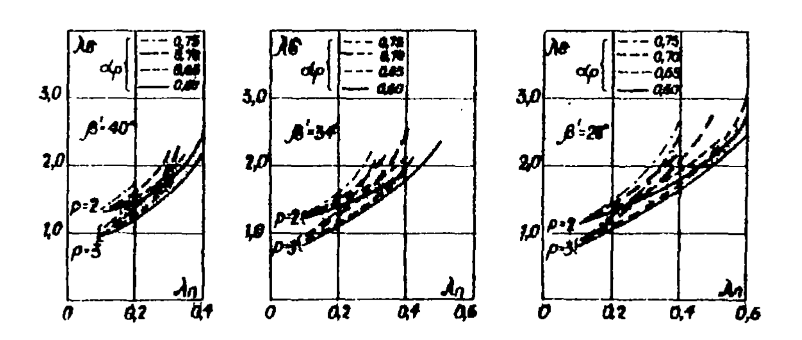


Рис. 20. Зависимость величины K_f от коэффициента для прямых ($\alpha_0' = 0$), трапецеидальных (α_0' = = 0,35) и треугольных (α_0' = 0,5) полюсов.



Iис. 2I. К определению удельной магнитной проводимости междуполюсного пространства для машин с р = 2 и р = 3.

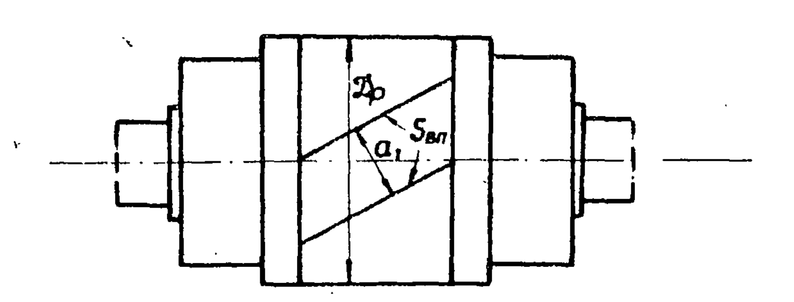


Рис. 22. К определению удельной магнитной проводимости междуполюсного пространства двухполюсной машины.

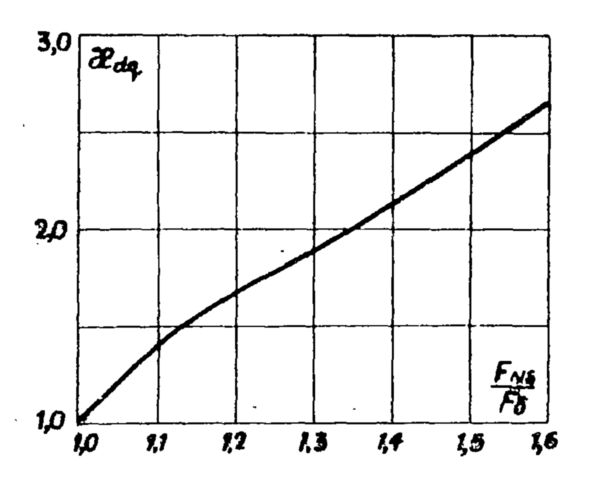


Рис. 23. Зависимость величины $\varkappa_{dq}$ от отношения F_{NS}/F_δ (по данным [81]).

78. Предварительная величина угла $\delta_{\mu\theta}$, град [97].

Определяется по рис.24 (при этом считается, что $\theta_1' = \theta'$).

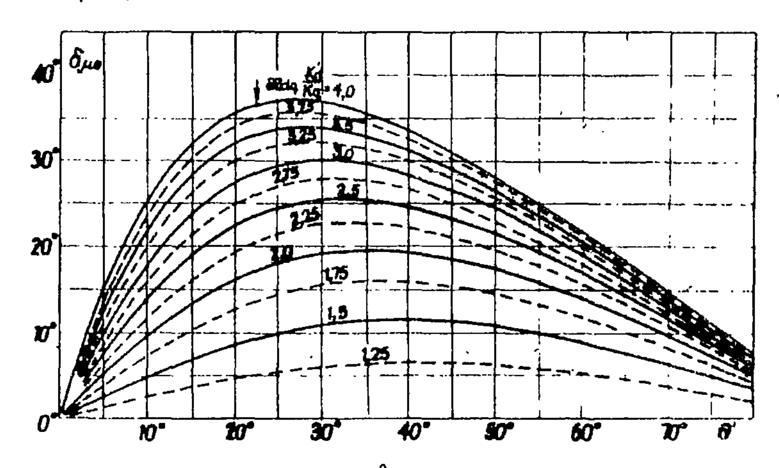


Рис.24. Величина угла $\delta_{\mu\theta}$ в зависимости от угла рассогласования θ' и величины $\varkappa_{dq}\frac{K'd}{Kq}$.

79. Предварительная величина угла θ' , град:

$$\theta' = \theta_1' - \delta_{\mu\theta}.$$

80. Уточнение величин углов $\delta_{\mu\theta}$ и θ'.

По рис.24 при помощи кривой, соответствующей значению $\varkappa_{dq}\frac{K'd}{Kq}$ (поз.77), определяются соответствующие друг другу величины углов θ' и $\delta_{\mu\theta}$, которые в сумме дают угол θ_1' (поз.74), т.е. $\theta' + \delta_{\mu\theta} = \theta_1'$

81. Величина угла θ , град:

$$\theta = \theta' + \beta .$$

82. Результирующая э.д.с. по продольной оси машины – $U_{\mu d}$, в:

$$U_{\mu d} = U_{\mu} \cdot \cos\theta',$$

то же в относительных единицах :

$$U_{\mu d} = U_{\mu d}/U_1 .$$

83. Продольная м.д.с. реакции якоря – F_{ad}, а:

$$F_{ad} = K_{ad} \cdot F_a \cdot \sin\psi ,$$

где $F_a = 2{,}7 \frac{W_1 \cdot f_{w1}}{p} I_1$, а ;

$$\psi = \varphi + \theta' + \beta ,$$

K_{ad} определяется по рис. 25 в соответствии с величинами α_p и δ_1/a [54] .

84. Междуполюсная м.д.с. при номинальной нагрузке – F_{NSH} , а :

$$F_{NSH} = F_{N\delta} + F_{ad} .$$

85. Принимаем конструкцию машины

(например, изображенную на рис.26) .

86. Магнитный поток в цилиндре ротора под нагрузкой – $\Phi_{пн}$, вб :

$$\Phi_{пн} = p\Phi_{\delta d} + F_{NSH} \cdot \Lambda_{\delta} \cdot \mu_0 \cdot D_p ,$$

где $\Phi_{\delta d} = \Phi \cdot U_{\mu d}$, вб .

87. Коэффициент рассеяния индуктора – $\sigma_н$:

$$\sigma_н = \frac{\Phi_{пн}}{p \cdot \Phi_{\delta d}} .$$

88. Сечение цилиндра ротора – $S_ц$, м^2.

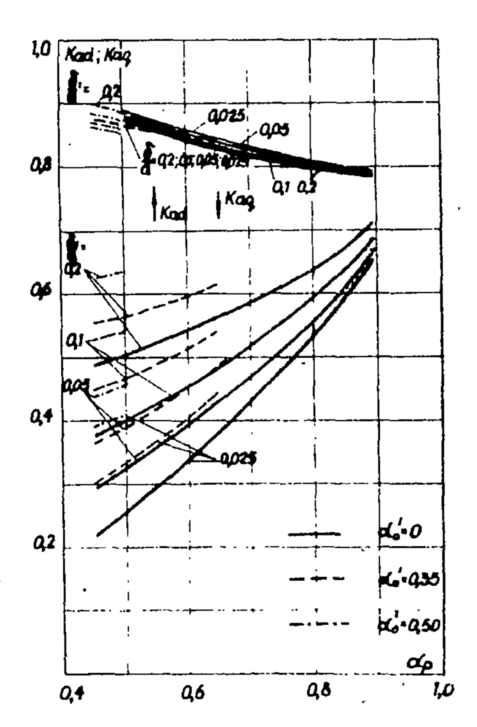


Рис. 25. Зависимость величин K_{ad} и K_{aq} от коэффициента для прямых (α'_o = 0), трапецеидальных (α'_o = 0,35) и треугольных (α'_0 = = 0,5) полюсов.

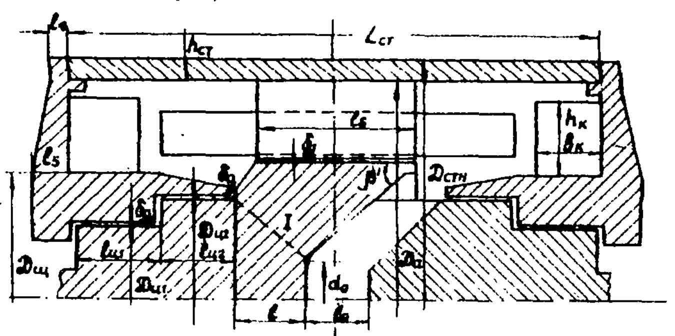


Рис. 26. Пример компоновки бесконтактного синхронного двигателя с внешним магнитопроводом.

89. Сечение цилиндрического выступа подшипникового щита – $S_{вщ}$, м^2.

90. Сечение подшипникового щита у входа в торцевую часть – $S_{щт}$, м^2.

91. Сечение подшипникового щита в зоне замка – $S_{щз}$, м^2.

92. Расчетное среднее сечение подшипникового щита – $S_{щ}$, м^2:

$$S_{щ} = \frac{S_{щт} + S_{щз}}{2}.$$

93. Сечение станины – $S_{ст}$, м^2.

94. Сечение полюса – $S_{к}$, м^2.

95. Длина магнитной силовой линии в станине – $l_{ст}$, м.

96. Длина магнитной силовой линии в цилиндрах ротора – $l_{ц}$, м.

97. Длина магнитной силовой линии по двум полюсам ротора – $l_{к}$, м.

98. Длина магнитной силовой линии по двум подшипниковым щитам – $l_{щ}$, м.

99. Магнитная индукция в станине – $B_{ст}$, тл:

$$B_{ст} = Ф_{пн} / S_{ст}.$$

100. М.д.с. станины – $F_{ст}$, а:

$$F_{ст} = l_{ст} \cdot H_{ст},$$

где $H_{ст}$ выбираем по таблице П-5 [81] в соответствии с величиной магнитной индукции $B_{ст}$, тл.

101. Магнитная индукция в подшипниковых щитах – $B_{щ}$, тл:

$$B_{щ} = Ф_{пн} / S_{щ}.$$

102. М.д.с. подшипниковых щитов – $F_щ$, а:

$$F_щ = \ell_щ \cdot H_щ ,$$

где $H_щ$ определяем по таблице П-5 [81] в соответствии с $B_щ$, тл.

103. Магнитная индукция в цилиндрах ротора – $B_ц$, тл:

$$B_ц = \Phi_{пн} / S_ц .$$

104. М.д.с. цилиндров ротора – $F_ц$, а:

$$F_ц = \ell_ц \cdot H_ц ,$$

где $H_ц$ определяем по таблице П-5 [81] для $B_ц$, тл.

105. Магнитная индукция в полюсах ротора – $B_к$, тл:

$$B_к = \Phi_{пн} / S_к .$$

106. М.д.с. полюсов ротора – $F_к$, а:

$$F_к = \ell_к \cdot H_к ,$$

где $H_к$ находим по таблице П-5 [81] для $B_к$, тл.

107. Магнитная индукция в дополнительных воздушных зазорах – $B_{\delta д}$, тл:

$$B_{\delta д} = \Phi_{пн} / \delta_д .$$

108. М.д.с. дополнительных воздушных зазоров – $F_{\delta д}$, а:

$$F_{\delta д} = 1{,}6 \cdot B_{\delta д} \cdot \delta_д \cdot 10^6 .$$

109. М.д.с. возбуждения электродвигателя при нагрузке – $F_{вн}$, а:

$$F_{вн} = F_{Nзн} + F_{ст} + F_щ + F_ц + F_к + F_{\delta д} .$$

Обмотка возбуждения

110. Количество витков обмотки возбуждения – $W_в$.

Выбираем предварительно, с учетом системы питания

и конструкции обмоток возбуждения:

$$W_в = 2 \cdot W_к .$$

III. Ток возбуждения - $I_в$, а:

$$I_в = \frac{K_{бв} \cdot F_{вн}}{2 \cdot W_к} ,$$

где $K_{бв}$ = I,I ÷ I,I5 - коэффициент запаса, учитывающий технологию изготовления машины и отклонение параметров активных материалов магнитопровода.

II2. Плотность тока в обмотке возбуждения - $\Delta_в$, а/м^2. Ориентировочно можно принять $\Delta_в$ = (2,2 ÷ 2,5)10^6 а/м^2. Бо́льшие значения относятся к коротким машинам с сравнительно малыми плотностями тока в статорной обмотке.

II3. Сечение и марка провода обмотки возбуждения - $S_в$, м^2. Марка провода в зависимости от класса нагревостойкости обмоток проектируемой машины выбирается, например, по таблицам, приведенным в [8I, 92]. Диаметр провода и сечение, близкое к расчетному, с учетом ранее выбранной марки провода выбираются по таблице IУ-I [8I].

II4. Площадь поперечного сечения катушки обмотки возбуждения - $S_{кв}$, м^2:

$$S_{кв} = W_к \cdot d^2_{виз} \cdot K_р ,$$

где $K_р$ - коэффициент разбухания катушки:

$$K_р = 1,1 \div 1,25.$$

115. Ширина катушки - $b_к$, м.

Выбирается из конструктивных соображений.

116. Высота катушки - $h_к$, м:

$$h_к = S_{кв}/b_к .$$

117. Внутренний диаметр катушки возбуждения - $D_{кв}$, м.

118. Наружный диаметр катушки возбуждения - $D_{кн}$, м:

$$D_{кн} = D_{кв} + 2 \cdot h_к .$$

119. Длина провода обмотки возбуждения - $L_в$, м:

$$L_в = 2\pi \cdot D_{ср} \cdot W_к ,$$

где $D_{ср}$, м - средний диаметр катушки возбуждения:

$$D_{ср} = D_{кв} + h_к .$$

120. Сопротивление обмотки возбуждения при расчетной температуре, ом (см. п. I) :

$$r_в = \frac{L_в}{\gamma \cdot S_в} .$$

121. Мощность потерь в обмотке возбуждения - $P_в$, квт:

$$P_в = I_в^2 \cdot r_в \cdot 10^{-3} .$$

122. Напряжение возбуждения - $U_в$, в:

$$U_в = I_в \cdot r_в .$$

123. Суммарные потери в машине - $\Sigma p'$, квт:

$$\Sigma p' = \Sigma p + P_в .$$

124. Коэффициент полезного действия электродвигателя $-\eta$, %:

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100}{P_2 + \Sigma p'} .$$

П р и м е р

Р а с ч е т б е с к о н т а к т н о г о с и н х р о н н о г о э л е к т р о д в и г а т е л я м о щ н о с т ь ю IO квт

I. Н о м и н а л ь н ы е д а н н ы е

Мощность номинальная . . . . P_H = IO квт

Число фаз . . . . m_1 = 3

Напряжение сети линейное . . . . . $U_л$ = 380 в

Частота сети . . . . f = 50 гц

Скорость вращения синхронная . . . . n = I500об/мин

Коэффициент мощности . . . . $\cos\varphi$ = I,0

Соединение фаз обмотки статора . Y/Δ = 380/220в

2. Н о м и н а л ь н ы е в е л и ч и н ы и о с н о в н ы е р а з м е р ы

I. Число пар полюсов - р:

$$p = \frac{60 f_1}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

2. Фазовый ток статора - $I_\sim$:

$$I_1 = \frac{P_H}{\eta \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3} \cdot U_л} = \frac{10 \cdot 10^3}{0,895 \cdot 1 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 17 \text{ a}.$$

3. Расчетная мощность - P':

$$P' = \frac{K_E \cdot P_H}{\eta \cdot \cos\varphi} = \frac{0,96 \cdot 10}{0,895 \cdot 1} = 10,7 \text{ ква},$$

где K_E = 0,96.

4. Внутренний диаметр расточки статора – D :

$$D = I,I5 : 0,39 \sqrt[3]{\frac{C_A \cdot P'}{\lambda \cdot n}} = I,I5 : 0,39 \sqrt[3]{\frac{(6,0 \div 8,2) . I0,7}{0,65 . I500}} =$$

$= 0,I82 \div 0,202$ м.

Принимаем D = 0,I8 м.

5. Наружный диаметр пакета статора – D_a :

$$D_a = (I,6I \div I,56) . D = (I,6I - I,56) 0,I8 = 0,29 \div 0,28 \text{м.}$$

Выбираем железо 6-го габарита

D_a = 0,29I м.

6. Число пазов на полюс и фазу – q_1 .

Принимаем q_1 = 3.

7. Число пазов статора – Z_1 :

$$Z_1 = 2p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2 . 2 . 3 . 3 = 36.$$

8. Полюсное деление, выраженное в пазах, – τ_n :

$$\tau_n = \frac{Z_1}{2 \cdot p} = \frac{36}{2 : 2} = 9.$$

9. Полюсное деление статора – τ :

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi . 0,I8}{2 : 2} = 0,I4I \text{ м.}$$

I0. Зубцовое деление статора – t_{z1} :

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{Z_1} = \frac{\pi : 0,I8}{36} = 0,0I57 \text{ м.}$$

II. Главный воздушный зазор – δ_1 .

Выбираем δ_1 = $0,9 \cdot I0^3$ м.

I2. Шаг обмотки по пазам - $У_п$:

$$y_n = \frac{Z_1}{2 \cdot p} \mp \varepsilon = \frac{36}{2 \cdot 2} - 2 = 7 ; \quad (I \rightarrow 8).$$

I3. Коэффициент укорочения шага - β_1 :

$$\beta_1 = y_n / \tau_n = 7/8 = 0{,}778.$$

I4. Коэффициент скоса пазов - $К_{ск}$.

Принимаем $К_{ск} = I$.

I5. Обмоточный коэффициент - $К_{w1}$:

$$К_{w1} = \frac{0{,}5}{q_1 \sin 30°/q_1} \sin \beta_1 \frac{\pi}{2} = \frac{0{,}5}{3 \cdot \sin 10^0} \sin 0{,}778 \frac{\pi}{2} =$$

$$= 0{,}94 \cdot 0{,}957 = 0{,}90.$$

I6. Коэффициент полюсного перекрытия - α_p .

Принимаем ротор с трапецеидальными наконечниками

$$\alpha_p = 0{,}65.$$

I7. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия - α_δ и коэффициент формы кривой - $К_В$.

Находим по рис. 6.7 $\alpha_\delta = 0{,}76$ и $К_В = I{,}I65$ для

$$\alpha_p = 0{,}65 \text{ и } \frac{\delta}{\tau} = \frac{0{,}9 \cdot 10^{-3}}{0{,}141} = 0{,}64 \cdot 10^{-2} =$$

$$= 0{,}0064.$$

I8. Индукция в главном воздушном зазоре - $B_{\delta 1}$ и линейная нагрузка - А.

Выбираем $B_{\delta 1} = 0{,}603$ тл и $A = 2{,}81 \cdot 10^4$ а/м

(см. рис. I0).

I9. Расчетная длина статора - ℓ_δ :

$$\ell_\delta = \frac{0,61 \cdot P' \cdot 10^4}{\alpha_\delta \cdot K_B \cdot K_{w1} \cdot B_{\delta 1} A \cdot D^2 \cdot n} =$$

$$= \frac{0,6I \ . \ I0,7 \ . \ I0^4}{0,76 \ . \ I,I65 \ . \ 0,9 \ . \ 0,603 \ . \ 2,8I \ . \ I0^4 . \ 0,I8^2 \ . \ I500} =$$

= 0,I0 м.

20. Магнитный поток полюса - Ф :

$$\Phi = \alpha_\delta \cdot \tau \cdot \ell_\delta \cdot B_{\delta 1} = 0,76 \ . \ 0,I4I \ . \ 0,I0 \ . \ 0,603 =$$

= 0,00646 вб.

2I. Число витков в фазе - W_1 ;

$$W_1 = \frac{K_E \, U_1}{4 \cdot K_B \cdot K_{w1} f_1 \Phi} = \frac{0,86 \ . \ 220}{4 \ . \ I,I65 \ . \ 0,9 \ . \ 50 \ . \ 0,00646} =$$

= I56 витков.

22. Число витков в секции - W_c :

$$W_c = \frac{m_1 W_1}{Z_1} = \frac{3 \ . \ I56}{36} = I3 \text{ витков.}$$

23. Уточнение величины линейной нагрузки - A:

$$A = \frac{I_1 \cdot 6 \cdot W_1}{\pi \cdot D} = \frac{I7 \ . \ 6 \ . \ I56}{0,I8} = 2,8I \ . I0^4 \text{ а/м.}$$

24. Уточнение величины магнитной индукции - $B_{\delta 1}$:

$$B_{\delta 1} = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \cdot \tau \cdot \ell_\delta} = \frac{0,00646}{0,76 \ . \ 0,I4I \ . 0,I0} = 0,604 \text{ тл.}$$

25. Форма паза и основные его размеры.

Выбираем паз рис. 27,а :

$b = 8{,}7 \cdot 10^{-3}$ м; $b' = 11{,}6 \cdot 10^{-3}$ м;

$h_п' = 27 \cdot 10^{-3}$ м; $h_ш = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ м;

$b_ш = 3{,}7 \cdot 10^{-3}$ м.

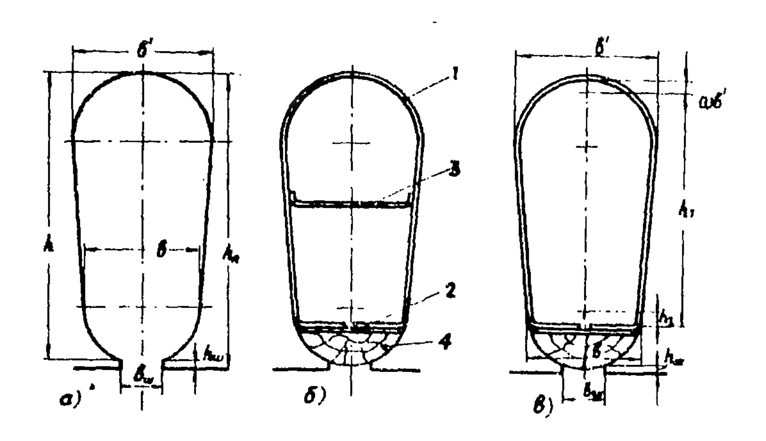


Рис. 27. Паз электродвигателя P_2 = 10 квт, 380 в, 1500 об/мин.

26. Пазовая изоляция и изоляционные материалы статорной обмотки.

Выбираем класс изоляции В (рис. 27,б):

I – пазовая изоляция, выполненная последовательно от стенки паза одним слоем электронита толщиной $0,2 \cdot 10^{-3}$ м; одним слоем гибкого миканита толщиной $0,2 \cdot 10^{-3}$ м и одним слоем стеклолакоткани толщиной $0,15 \cdot 10^{-3}$ м;

2 – прокладка под клин, выполненная из стеклотекстолита толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м ;

3-междуслойная изоляция, выполненная так же, как и пазовая изоляция (см.п.I),но все ее части склеены лаком ПЭ-993 .

27. Площадь паза за вычетом пазовой изоляции и площади клина – S'_n :

$$S'_n = \frac{b'+b-2b_{из}}{2}\left[h - \frac{b+b'}{2} - h_{из}\right] + \frac{\pi(b'-b_{из})^2}{8} + \frac{\pi b^2}{8} - S_{кл} =$$

$$= \frac{8,7+11,6-1,1}{2}\left[27 - \frac{8,7+11,6}{2} - 2,1\right] +$$

$$+\frac{\pi(11,6-0,55)^2}{8} + \frac{\pi 8,7^2}{8} - 20 = 200,2\ мм^2 = 0,20 \cdot 10^{-3}\ м^2.$$

28. Плотность тока в статорной обмотке – Δ_a .

Принимаем $\Delta_a = 4,61 \cdot 10^6$ а/м^2.

29. Сечение проводника фазы статора – S_a :

$$S_a = \frac{I_1}{a_1 \cdot \Delta_a} = \frac{17,0}{3 \cdot 4,61 \cdot 10^6} = 1,23 \cdot 10^{-6}\ м^2.$$

30. Марка провода и его размеры.

Марка провода ПЭТВ $d/d_{из} = 1,25 \cdot 10^{-3} / 1,33 \cdot 10^{-3}$ м

и $S_a = 1,227 \cdot 10^{-6}$ м^2.

31. Коэффициент заполнения свободной площади паза статора

- $K_з$:

$$K_з = \frac{n_n \cdot d_{из}^2}{S_n'} = \frac{78 \cdot 1{,}33^2 \cdot 10^{-6}}{0{,}20 \cdot 10^{-3}} = 0{,}69.$$

32. Средняя длина обмотки статора - ℓ_{cp} :

$$\ell_{cp} = 2\,(\ell_\delta + \ell_{л1}) = 2(0{,}10 + 0{,}185) = 0{,}57 \text{ м},$$

где

$$\ell_{л1} = K_s \cdot \tau + 2 \cdot B = 1{,}3 \cdot 0{,}127 + 0{,}02 = 0{,}185 \text{ м},$$

$$\tau_y = \beta_1 \frac{\pi (D + h_n)}{2p} = 0{,}778 \; \frac{\pi\,(0{,}18 + 0{,}028)}{2 \cdot 2} = 0{,}127 \text{ м}.$$

33. Длина вылета лобовых частей - $\ell_в$:

$$\ell_в = K_в \cdot \tau_y + B = 0{,}4 \cdot 0{,}127 + 0{,}01 = 0{,}061 \text{ м}.$$

34. Длина обмотки фазы статора - $L_ф$:

$$L_ф = \ell_{cp} \cdot W_1 \cdot 10^{-2} = 0{,}57 \cdot 156 = 89 \text{ м}.$$

35. Сопротивление фазы обмотки статора постоянному току при 348°К (75°С):

$$r = \frac{L_ф}{\gamma \cdot a_1 \cdot S_a} = \frac{89}{46 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 1{,}227 \cdot 10^{-6}} = 0{,}527 \text{ ом}.$$

36. Коэффициент проводимости пазового рассеяния - $\lambda_{п1}$:

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3b} K_\beta + \left(0{,}785 - \frac{b_{ш1}}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}}\right) K_\beta' =$$

$$= \frac{22 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 8{,}7 \cdot 10^{-3}}\, 0{,}88 + \left(0{,}785 - \frac{3{,}7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 8{,}7 \cdot 10^{-3}} - \right.$$

$$- \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{8,7 \cdot 10^{-3}} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{3,7 \cdot 10^{-3}}) \, 0,85 = 1,38,$$

где

$h_1 = 22 \cdot 10^{-3}$ м и $h_2 = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м (см. рис. 27в).

37. Коэффициент воздушного зазора - K_δ :

$$K_\delta = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta_1} = \frac{1,57 \cdot 10^{-3}}{1,57 \cdot 10^{-3} - 1,86 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}} = 1,12,$$

где

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш1}/\delta_1)^2}{5 + b_{ш1}/\delta_1} = \frac{(3,7 \cdot 10^{-3}/0,9 \cdot 10^{-3})^2}{5 + 3,7 \cdot 10^{-3}/0,9 \cdot 10^{-3}} = 1,86.$$

38. Проводимость дифференциального рассеяния - λ_{g1} :

$$\lambda_{g1} = \frac{t_{z1} (q_1 K_{w1})^2 \cdot \rho_{g1} \cdot K_{ш1}}{\delta_1 \cdot K_\delta} \sigma_{g1} \cdot K_c =$$

$$= 0,9 \cdot \frac{1,57 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 0,9)^2 \cdot 1 \cdot 0,968}{0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1,12} 0,011 \cdot 0,9 =$$

$$\approx 0,98,$$

где

$$K_{ш1} \approx 1 - 0,033 \frac{b_{ш1}^2}{t_{z1} \cdot \delta_1} =$$

$$= 1 - 0,033 \frac{(3,7 \cdot 10^{-3})^2}{15,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}} = 0,968.$$

39. Проводимость рассеяния лобовых частей обмотки статора - $\lambda_{л1}$:

$$\lambda_{л1} = \frac{0,955 \cdot q_1 \cdot K_p^2 \cdot \tau_л \cdot K_л \cdot K_{л\sigma}}{l_\delta} =$$

$$= \frac{0,955 \cdot 3 \cdot 0,94^2 \cdot 0,163 \cdot 0,502 \cdot 1,1}{0,10} = 2,28,$$

где

$$K_p = \frac{0,5}{q_1 \sin 30°/q_1} = \frac{0,5}{3 \sin 10^0} = 0,94 ;$$

$$\tau_л = \frac{\pi D_л}{2 \cdot p} = \frac{0,208}{2 \cdot 2} = 0,163 \text{ м} ;$$

$$D_л = 0,208 \text{ м} ;$$

$$K_л = \frac{0,5 \cdot l_{л1}}{2 \cdot l_в \sqrt{1 + \frac{\beta_1 \tau_л}{2 l_в}}} = \frac{0,5 \cdot 0,185}{2 \cdot 0,061 \sqrt{1 + \frac{0,778 \cdot 0,163}{2 \cdot 0,061}}} =$$

$$= 0,502 .$$

40. Суммарная проводимость – $\Sigma\lambda$:

$$\Sigma\lambda = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1} = 1,38 + 0,98 + 2,28 = 4,64 .$$

41. Индуктивное сопротивление обмотки статора – x_1 :

$$x_1 = 0,158 \cdot f_1 \left(\frac{W_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{p \cdot q_1} \Sigma\lambda =$$

$$= 0,158 \cdot 50 \left(\frac{156}{100}\right)^2 \frac{0,1}{2 \cdot 3} \cdot 4,64 = 1,49 \text{ ом.}$$

42. Полное сопротивление обмотки статора – Z_1 :

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = \sqrt{0,527^2 + 1,49^2} = 1,58 \text{ ом.}$$

43. Величина внутреннего напряжения фазы статора - U_μ :

$$U_\mu=\sqrt{U_1^2+(I_1 Z_1)^2-2U_1 \cdot I_1 \cdot Z_1}= \sqrt{= 220^2 + (17 \cdot 1,58)^2 - 2 \cdot 220 \cdot 17 \cdot 0,527} = 212,5 \text{ в}.$$

44. Величина коэффициента K_E :

$$K_E=\frac{U_\mu}{U_1} = \frac{212,5}{220} = 0,965.$$

Корректировки выполненного расчета не требуется, поскольку K_E близок к принятому ранее (см. п. 3) $K_E = 0,96$.

3. Магнитная цепь статора

45. М.д.с. главного воздушного зазора - F_δ :

$$F_\delta = 1,6 \cdot K_\delta \cdot \delta_1 B_\delta 10^6 = 1,6 \cdot 1,12 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} \times 0,604 \cdot 10^6 = 972 \text{ а}.$$

46. Ширина зубца статора - b_{z1} :

$$b_{z1} = \frac{\pi(D+2h_n-b')}{Z_1} - b' =$$

$$= \frac{\pi\ (0,18 + 2 \cdot 0,028 - 0,0116)}{36} - 0,0116 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

47. Индукция в зубцах статора - B_{z1} :

$$B_{z1} = \frac{t_{z1} \cdot B_{\delta 1}}{b_{z1} \cdot K_c} = \frac{15,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,604}{8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 1,25 \text{ тл}.$$

48. М.д.с. зубцов статора - F_{z1} (сталь ЭII):

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{п} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 22{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 976 = 44{,}5 \text{ а}.$$

49. Высота спинки статора - h_{a1} :

$$h_{a1} = \frac{D_a - D - 2h_{п1}}{2} = \frac{0{,}291 - 0{,}18 - 2 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{2} =$$

$$= 27{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

50. Индукция в спинке статора - B_{a1} :

$$B_{a1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{a1} \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{0{,}00646}{2 \cdot 27{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}10 \cdot 0{,}95} =$$

$$= 1{,}225 \text{ тл}.$$

51. Средняя длина силовой магнитной линии в спинке статора - L_{a1} :

$$L_{a1} = \frac{\pi (D_a - h_{a1})}{2p} = \frac{\pi (0{,}291 - 28 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 2} = 0{,}206 \text{ м}.$$

52. М.д.с. спинки статора - F_{a1} :

$$F_{a1} = \xi \cdot H_{a1} \cdot L_{a1} = 0{,}41 \cdot 910 \cdot 0{,}206 = 76{,}8 \text{ а}.$$

53. М.д.с. холостого хода - F_{NS} :

$$F_{NS} = F_\delta' + F_{z1} + F_{a1} = 972 + 44{,}5 + 76{,}8 = 1093{,}3 \text{ а}.$$

54. Коэффициент насыщения пакета статора - K_μ :

$$K_\mu = \frac{F_{NS}}{F_\delta} = \frac{1093{,}3}{972} = 1{,}13.$$

55. Величина угла $\beta\ (\angle \dot{U}_1 o \dot{U}_\mu)$:

$$\beta = \arccos \frac{U_1^2 + U_\mu^2 - (I_1 Z_1)^2}{2 U_1 U_\mu} =$$

$$= \arccos \frac{220^2 + 212,5^2 - (17 \ .\ 1,58)^2}{2\ .\ 220\ .\ 212,5} = 6^0\ 45'.$$

56. Намагничивающий ток статора - I_μ :

$$I_\mu = 0,474 \frac{p \cdot F_{NS}}{W_1 \cdot f_{wi}} = 0,474\ \frac{2\ .\ 1093,3}{156\ .\ 0,90} = 7,4 \text{ а}.$$

4. Коэффициент полезного действия без учета потерь в обмотке возбуждения

57. Потери в меди обмотки статора - $P_м$:

$$P_м = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3} = 3.\ 17^2.\ 0,527\ .10^{-3} = 0,457 \text{ квт}.$$

58. Потери в стали ярма статора - P_{cc} :

$$P_{cc} = 1,6 \cdot P'_{cc} \cdot G_{a1} = 1,6\ .\ 5,15\ .\ 16,8\ .\ 10^{-3} = 0,138 \text{ квт},$$

где

$$G_{a1} = h_{a1} \cdot l_\delta \cdot K_c \cdot L_{a1} \cdot 2p \cdot \gamma_c =$$

$$= 0,0275\ .\ 0,1\ .\ 0,95\ .\ 0,206\ .\ 2\ .\ 2\ .\ 7800 = 16,8 \text{ кг};$$

$P'_{cc} = 5,15$ вт/кг.

59. Потери в зубцах статора - P_{cz} :

$$P_{cz} = 1,8 \cdot P'_{cz} \cdot G_{z1} \cdot 10^{-3} = 1,8\ .\ 5,4\ .\ 5,37\ ,\ 10^{-3} = 0,052 \text{ квт},$$

где

$$G_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot l_\delta \cdot K_c \cdot Z_1 \cdot \gamma_c =$$

$$= 0,028\ .\ 0,0072\ .\ 0,1\ .\ 0,95\ .\ 36\ .\ 7800 = 5,37 \text{ кг};$$

$P'_{cz} = 5{,}4$ вт/кг.

60. Магнитные потери в пакете статора от основного магнитного поля – P_{c1} :

$$P_{c1} = P_{cc} + P_{cz} = 0{,}138 + 0{,}052 = 0{,}19 \text{ квт}.$$

61. Механические потери – $P_{мх}$:

$$P_{мх} \approx 0{,}8 \cdot 2p \left(\frac{v}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{\frac{\ell_1}{0{,}19}} = 0{,}8 \cdot 4 \left(\frac{14}{40}\right)^3 \sqrt{\frac{0{,}1}{0{,}19}} =$$

$= 0{,}1$ квт,

где

$$v = \frac{\pi \cdot D_p \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}178 \cdot 1500}{60} = 14 \text{ м/сек}.$$

62. Магнитная индукция третьей гармоники – B_3 :

$$B_3 = \sqrt{(B_{f3} - B_{d3})^2 - B^2_{3q}} = \sqrt{(-0{,}0905)^2 + 0{,}633^2} =$$

$= 0{,}638$ тл,

где

$$B_{d3} = B^*_{d3} \cdot B_{\delta 1} = 0{,}15 \cdot 0{,}604 = 0{,}0905 \text{ тл};$$

$$B_{q3} = B^*_{q3} \cdot B_{\delta 1} = 1{,}05 \cdot 0{,}604 = 0{,}633 \text{ тл};$$

$$B_{f3} = (0{,}6 - B^*_{f3})\, B_{\delta 1} = (0{,}6 - 0{,}6) \cdot 0{,}604 = 0.$$

63. Добавочные потери в зубцах статора при к.з. и $f_1 = 50$ гц – P_{z3} :

$$P_{z3} \approx 10{,}7 \cdot P_{10/50} \cdot B_3^{5/4} \cdot G_{z1} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 10{,}7 \cdot 3{,}3 \cdot 0{,}638^{5/4} \cdot 5{,}37 \cdot 10^{-3} = 0{,}106 \text{ квт}.$$

64. Добавочные потери на поверхности ротора при холостом ходе, вызванные зубчатостью статора,- $P_{пов}$:

$$P_{пов} = 2 \cdot p \cdot \tau \cdot \alpha_p \cdot \ell_p \cdot P'_{пов} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 2 \ . \ 2 \ . \ 0{,}141 \ . \ 0{,}65 \ . \ 0{,}1 \ . \ 2220 \ . \ 10^{-3} = 0{,}0812 \text{ квт},$$

где

$$P'_{пов} = K_0 \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \left(B_0 \cdot t_{z1} \right)^2 \cdot 10^6 =$$

$$= 23{,}3 \left(\frac{36 \ . \ 1500}{10 \ .000} \right)^{1,5} . \ (0{,}176 \ . \ 1{,}57 \ . \ 10^{-3})^2 \ .10^6 =$$

$$= 2220 \text{ вт/м}^2 ;$$

$$B_0 = \beta_0 \cdot K_\delta \cdot B_{\delta 1} = 0{,}26 \ . \ 1{,}12 \ . \ 0{,}604 = 0{,}176 \text{ тл}.$$

65. Добавочные потери на поверхности ротора от высших гармоник - P_{VR} :

$$P_{VR} = 1{,}4 \ . \ 4{,}5 \ . \ 10^{-7} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,5} \frac{A^2 \cdot \tau^4 \cdot S_R}{100 \cdot \delta_1^2} \varphi(\beta_1) =$$

$$= 1{,}4 \ . \ 4{,}5 \ . \ 10^{-7} \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \frac{2{,}81^2 \ . \ 10^8 \ . \ 0{,}141^4 \ . \ 0{,}0364}{(0{,}9 \ . \ 10^{-3})^2 \ . \ 100} \times$$

$$\times 0{,}5 \ . \ 10^{-4} = 0{,}004 \text{ квт},$$

где

$$S_R = \pi \cdot D_p \cdot \ell_\delta \cdot \alpha_p = \pi 0{,}1782 \ . \ 0{,}1 \ . \ 0{,}65 = 0{,}0364 \text{ м}^2 ;$$

$$D_p = D - 2\delta_1 = 0{,}18 - 1{,}8 \ . \ 10^{-3} = 0{,}1782 \text{ м}.$$

66. Добавочные потери от зубцовых полей на поверхности ротора - P_{VZR} :

$$P_{vzR} = 1{,}4 \cdot 1{,}14 \cdot 10^{-7}\ \frac{A^2 \cdot t_{z1}^4 \cdot K_{w1}^2 (z_1/p)^{1,5} \cdot K_э^2 \cdot S_R}{100 \cdot \delta_1^2} =$$

$$= 1{,}4 \cdot 1{,}14 \cdot 10^{-7}\ \frac{2{,}81^2 \cdot 10^8 \cdot 0{,}0157^4 \cdot 0{,}9^2 \cdot 18^{1,5} \cdot 0{,}961}{0{,}9^2 \cdot 10^{-6} \cdot 100} \times$$

$$\times \frac{0{,}0364}{} = 0{,}202 \text{ квт},$$

где

$$K_э^2 = \left(\frac{\alpha\nu}{\operatorname{sh}\alpha\nu}\right) = \left(\frac{0{,}361}{0{,}368}\right)^2 = 0{,}961\ ;$$

$$\alpha\nu = \frac{\pi\delta_1}{\tau} \cdot \frac{Z_1}{p}\ \frac{\pi\, 0{,}9 \cdot 10^{-3}}{141 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{36}{2} = 0{,}361.$$

67. Суммарные добавочные потери на поверхности ротора – $P_{доб2}$:

$$P_{доб2} = P_{пов} + P_{vR} + P_{vzR} = 0{,}0812 + 0{,}004 + 0{,}202 = 0{,}2872 \text{ квт}.$$

68. Добавочные потери в корпусе машины при холостом ходе – $P_к(xx)$:

$$P_к(xx) = 0{,}075p\left(\frac{\tau_a}{0{,}1}\right)\left(\frac{\ell_1}{0{,}1}\right)\sqrt{\frac{f_1}{500}}\ H_{км}^2\left(1+\frac{2\tau_a}{\pi\ell_1}\right)10^{-7} =$$

$$= 0{,}075 \cdot 2\left(\frac{0{,}228}{0{,}1}\right)\left(\frac{0{,}1}{0{,}1}\right)\sqrt{0{,}1} \cdot 910^2\left(1+\frac{2 \cdot 0{,}228}{0{,}1\,\pi}\right)10^{-7} =$$

$$= 0{,}022 \text{ квт},$$

где

$$\tau_a = \frac{\pi \cdot D_a}{2p} = \frac{\pi \cdot 0{,}291}{4} = 0{,}228 \text{ м}.$$

69. Добавочные потери на поверхности щитов и корпуса при к.з. :

$$P_{(щ+к)} = 5p\left(\frac{\tau}{0{,}1}\right)^4\left(\frac{A}{10^4}\right)^2\left(\frac{f_1}{500}\right)^{1,5}\left(\frac{2 \cdot 10^5}{\rho_к}\right)^{0,5} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 5 \cdot 2 \left(\frac{0,141}{0,1}\right)^4 \left(\frac{2,81 \cdot 10^4}{10^4}\right)^2 (0,1)^{1,5} \cdot 10^{-3} \approx 0,010 \text{ квт.}$$

70. Суммарные потери в машине без учета потерь на возбуждение – Σp :

$$\Sigma p = P_{c1} + P_{доб2} + P_{z3} + P_{мх} + P_{м1} + P(xx) + P(щ+к) =$$

$$= 0,19 + 0,287 + 0,106 + 0,10 + 0,457 + 0,022 + 0,01 =$$

$$= 1,17 \text{ квт.}$$

71. Коэффициент полезного действия без учета потерь на возбуждение – η :

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100}{P_2 + \Sigma p} = \frac{10}{10 + 1,17} \cdot 100 = 89,6 \%.$$

Корректировки выполненного расчета не требуется, поскольку к.п.д. близок к принятому ранее (см. п. 2, $\eta' = 89,5 \%$).

5. Полюса и внешний магнитопровод

72. Угол потерь в пакете статора – $\delta_{\mu c}$:

$$\delta_{\mu c} = \operatorname{arctg} \frac{r'_{\mu c}}{x'_{\mu c}} = \operatorname{arctg} \frac{1,155}{28,7} = \operatorname{arctg} 0,0403 =$$

$$= 2^{0}\ 20',$$

где
$$Z'_{\mu c} = r'_{\mu c} + j x_{\mu c} = j \frac{r''_{\mu c} \cdot x''_{\mu c}}{r''_{\mu c} + j x''_{\mu c}} =$$

$$= j \frac{713 \cdot 28,7}{713^2 + 28,7^2} (713 - j\ 28,7) = 1,155 + j\ 28,7 ;$$

$$r''_{\mu c} = \frac{m_1 U_\mu^2}{P_{c1}} = \frac{3 \cdot 2I2,5^2}{0,I9} \cdot I0^{-3} = 7I3 \text{ ом};$$

$$x''_{\mu c} = \frac{U_\mu}{I_\mu} = \frac{2I2,5}{7,4} = 28,7 \text{ ом}.$$

73. Величина полного тока возбуждения статора – I'_2 :

$$I'_2 = \sqrt{I_1^2 + I_\mu^2 + 2I_1 \cdot I_\mu \cdot \sin(\beta - \delta_{\mu c})} =$$

$$= \sqrt{I7^2 + 7,4^2 + 2 \cdot I7 \cdot 7,4 \sin(6^0 45' - 2^0 20')} =$$

$= I9,I$ а.

74. Величина угла – Θ'_1 :

$$\Theta'_1 = \arcsin \frac{P_2 + P_{MX} + P_{доб2}}{m_1 U_\mu \cdot I'_2} = \arcsin \frac{I0 + 0,I6I + 0,287}{3 \cdot 2I2,5 \cdot I9,I} =$$

$$= \arcsin 0,859 = 59^0 \, I2'.$$

75. Величина коэффициента K'_d :

$$K'_d = \frac{K_d}{1 + K_f \frac{R_{бq}}{R_б}} = \frac{0,9I}{I + I,08 \frac{0,495 \cdot I0^5}{I,69 \cdot I0^5}} =$$

$= 0,69$,

где

$K_d = 0,9I$ найден по рис. I8 для

$\alpha_p = 0,65$ и $\delta_1/a = 0,05$;

$K_f = I,08$ найден по рис. 20 для

$\alpha_p = 0,65$ и $\delta_1/a = 0,05$;

$$P_{\sigma g} = \frac{R_\sigma \cdot R_g}{P_\sigma \cdot R_g} = \frac{44{,}7 \cdot 10^5 \cdot 0{,}5 \cdot 10^5}{44{,}7 \cdot 10^5 + 0{,}5 \cdot 10^5} =$$

$= 0{,}495 \cdot 10^5$ I/ом.сек ;

$$R_\sigma = \frac{1}{\mu_0 \cdot \lambda_\sigma \cdot D_p} = \frac{I}{4\pi\ 10^{-7} \cdot 3 \cdot 0{,}1782} =$$

$= 44{,}7 \cdot 10^5$ I/ом.сек ;

$$R_g = \frac{2p \cdot \delta_g}{\mu_0 \cdot S_g} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3}}{4\pi\ 10^{-7} \cdot 0{,}0319} =$$

$= 0{,}5 \cdot 10^5$ I/ом.сек ;

$$S_g = \pi \cdot D_{ц1} \cdot l_{ц1} + \pi \cdot D_{ц2} \cdot l_{ц2} =$$

$= \pi \cdot 0{,}128 \cdot 0{,}042 + \pi \cdot 0{,}096 \cdot 0{,}05 = 0{,}0319$ м^2 ;

$$R_\delta = \frac{2p K_{\delta 1} \delta_1}{\mu_0 K_d D l_\delta} =$$

$$= \frac{2 \cdot 2 \cdot 1{,}12 \cdot 0{,}9 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}91 \cdot 0{,}18 \cdot 0{,}1} = 1{,}69\ 10^5 \text{ I/ом сек;}$$

$\lambda_\sigma = 3$ (см. рис. 2I для $\beta = 40^0$ и $\alpha_p = 0{,}65$).

76. Величина отношения K'_d/K_q :

$$\frac{K'_d}{K_q} = \frac{0{,}69}{0{,}54} = 1{,}28,$$

где $K_q = 0{,}54$ находим по рис. I8 для $\alpha_p = 0{,}6$ и $\delta_1/a = 0{,}05$.

77. Величина коэффициента $\varkappa_{dq} \frac{K'_d}{K_q}$:

$$\varkappa_{dq} \frac{K'_d}{K_q} = 1{,}5 \cdot 1{,}28 = 1{,}92 ,$$

где

$$\varkappa_{dq} = 1{,}5 \text{ по рис. 23 для } K_{\mu} = 1{,}13.$$

78. Предварительная величина угла $\delta_{\mu\theta}$:

$$\delta_{\mu\theta} = 13^0 \quad \text{(см. рис. 24).}$$

79. Предварительная величина угла θ' :

$$\theta' = \theta - \delta_{\mu\theta} = 59^0 12' - 13^0 = 46^0 12'.$$

80. Уточнение величин углов $\delta_{\mu\theta}$ и θ' :

$$\delta_{\mu\theta} = 18^0 \quad \text{и} \quad \theta' = 41^0 12'.$$

81. Величина угла θ :

$$\theta = \theta' + \beta = 41^0 12' + 6^0 45' \approx 48^0.$$

82. Результирующая э.д.с. по продольной оси машины – $U_{\mu d}$:

$$U_{\mu d} = U_{\mu} \cos\theta' = 212{,}5 \cos 41^0 12' = 212{,}5 \cdot 0{,}752 = 160 \text{ в},$$

то же в относительных единицах :

$$U^*_{\mu d} = \frac{U_{\mu d}}{U_1} = \frac{160}{220} = 0{,}726.$$

83. Продольная м.д.с. реакции якоря – F_{ad} :

$$F_{ad} = K_{ad} \cdot F_a \cdot \sin\psi = 0{,}84 \cdot 3210 \sin 48^0 = 2000 \text{ а},$$

где

$$F_a = 2{,}7 \frac{W_1 \cdot f_{W1}}{p} I_1 = 2{,}7 \frac{156 \cdot 0{,}9}{2} 17 = 3210 \text{ а};$$

$$\psi = \varphi + \theta' + \beta = \theta = 48^0;$$

$K_{ad} = 0{,}84$ определяем по рис. 25 для $\alpha_p = 0{,}65$ и

$\delta_1/a = 0{,}05.$

84. Междуполюсная м.д.с. при номинальной нагрузке – F_{NSH} :

$$F_{NSH} = F_{NS} + F_{ad} = 1093{,}3 + 2000 = 3093{,}3 \text{ а.}$$

85. Принимаем конструкцию машины , показанную на рис. 26.

86. Магнитный поток в цилиндре ротора под нагрузкой – $\Phi_{пн}$:

$$\Phi_{пн} = p\,\Phi_{\delta d} + p \cdot F_{NSH} \cdot \lambda_6 \cdot \mu_0 \cdot D_p =$$

$$= 2 .\ 0{,}0047 + 2 .\ 3093{,}3 .\ 3 .\ 4\pi .\ 10^{-7} .\ 0{,}1782 = 0{,}0136 \text{ вб,}$$

где

$$\Phi_{\delta d} = U^*_{\mu d}\Phi = 0{,}726 .\ 0{,}00646 = 0{,}0047 \text{ вб.}$$

87. Коэффициент рассеяния индуктора – $\sigma_н$:

$$\sigma = \frac{\Phi_{пн}}{p\,\Phi_{\delta d}} = \frac{0{,}0136}{2 .\ 0{,}0047} \approx 1{,}45.$$

88. Сечение первого цилиндра ротора – $S_{ц1}$ (см. рис. 26) :

$$S_{ц1} = \frac{\pi}{4} D_{1ц}^2 = \frac{\pi}{4} 0{,}096^2 = 0{,}00724 \text{ м}^2.$$

89. Сечение второго цилиндра ротора – $S_{ц2}$:

$$S_{ц2} = \frac{\pi}{4} D_{2ц}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0{,}128^2 = 0{,}01285 \text{ м}^2.$$

90. Сечение цилиндрического выступа подшипникового щита первой ступени – $S_{вщ1}$:

$$S_{вщ1} = \frac{\pi}{4}\left[D_{щ}^2 - (D_{ц1} + 2\delta_g)^2\right] =$$

$$= \frac{\pi}{4}\left[0{,}158^2 - (0{,}096 + 2 .0{,}5 .10^{-3})^2\right] = 0{,}01215 \text{ м}^2,$$

где δ_g = 0,5 . 10^{-3} мм – дополнительный воздушный зазор.

91. Сечение цилиндрического выступа подшипникового щита второй ступени – $S_{вщ2}$:

$$S_{вщ2} = \frac{\pi}{4}\left[D_{щ}^2 - \left(D_{ц2} + 2\delta_g\right)^2\right] =$$

$$= \frac{\pi}{4}\left[0,158^2 - (0,128 + 2.0,5 . 10^{-3})^2\right] = 0,00835 \text{ м}^2.$$

92. Сечение подшипникового щита у входа в торцевую часть зоны дополнительного зазора – $S_{щт}$:

$$S_{щт} = \pi \cdot D_{щ} \ell_5 = \pi \cdot 0,158 . 0,0245 = 0,01215 \text{ м}^2.$$

93. Сечение подшипникового щита у замка станины – $S_{щст}$:

$$S_{щст} = \pi \cdot (D_a - 0,04)\ell_4 = \pi (0,291 - 0,04) \cdot 0,0135 = 0,01215 \text{ м}^2.$$

94. Сечение станины – $S_{ст}$:

$$S_{ст} = \frac{\pi\left[D_{стн}^2 - (D_a - 0,04)^2\right]}{4} =$$

$$= \frac{\pi\left[0,313^2 - (0,291 - 0,004)^2\right]}{4} = 0,01215 \text{ м}^2.$$

95. Сечение I у основания когтя ротора – $S_к$:

$$S_к = 0,0134 \text{ м}^2.$$

96. Длина силовой магнитной линии в станине – $\ell_{ст}$:

$$\ell_{ст} = L_{ст} + h_{ст} = 0,33 + 0,013 = 0,343 \text{ м},$$

где

$L_{ст}$ = 0,33 м – длина станины (см. рис. 26);

$h_{ст}$ = 0,013 м – толщина станины.

97. Средняя длина силовой магнитной линии по двум цилиндрам ротора – $\ell_ц$:

$$\ell_ц = 2 \cdot (\ell_{ц1} + \ell_{ц2}) = 2 \cdot (0{,}046 + 0{,}054) = 0{,}2 \text{ м}.$$

98. Средняя длина силовой магнитной линии по двум когтям ротора – $\ell_к$:

$$\ell_к = 2 \cdot \ell_{к1} = 2 \cdot 0{,}05 = 0{,}1 \text{ м}.$$

99. Средняя длина силовых магнитных линий по двум подшипниковым щитам – $\ell_щ$:

$$\ell_щ = 2 \cdot \ell_{щ1} = 2 \cdot 0{,}08 = 0{,}16 \text{ м}.$$

100. Магнитная индукция в станине – $B_{ст}$:

$$B_{ст} = \frac{\Phi_{пн}}{S_{ст}} = \frac{0{,}0136}{0{,}01215} = 1{,}12 \text{ тл}.$$

101. М.д.с. станины – $F_{ст}$:

$$F_{ст} = H_{ст} \cdot \ell_{ст} = 1127 \cdot 0{,}343 = 386 \text{ а}.$$

102. Магнитная индукция в подшипниковых щитах – $B_щ$:

$$B_щ = \frac{\Phi_{пн}}{S_щ} = \frac{0{,}0136}{0{,}01215} = 1{,}12 \text{ тл}.$$

103. М.д.с. подшипниковых щитов – $F_щ$:

$$F_щ = H_щ \cdot \ell_щ = 1127 \cdot 0{,}16 = 180 \text{ а}.$$

I04. Магнитная индукция в цилиндре ротора – $B_ц$:

$$B_ц = \frac{\Phi_{пн}}{S_{ц1}} = \frac{0,0I36}{0,0I285} = I,06 \text{ тл.}$$

I05. М.д.с. цилиндров ротора – $F_ц$:

$$F_ц = H_ц \cdot \ell_ц = I022 \cdot 0,2 = 204,4 \text{ а.}$$

I06. Магнитная индукция в когтях ротора – $B_к$:

$$B_к = \frac{\Phi_{пн}}{S_к} = \frac{0,0I36}{0,0I34} = I,0I \text{ тл.}$$

I07. М.д.с. когтей – $F_к$:

$$F_к = H_к \cdot \ell_к = 938 \cdot 0,I = 93,8 \text{ а.}$$

I08. Магнитная индукция в дополнительных воздушных зазорах – $B_{\delta g}$:

$$B_{\delta g} = \frac{\Phi_{пн}}{S_g} = \frac{0,0I36}{0,03I9} = 0,427 \text{ тл.}$$

I09. М.д.с. дополнительных воздушных зазоров – $F_{\delta g}$:

$$F_{\delta g} = 1,6 \cdot B_{\delta g} \cdot \delta_g \cdot 10^6 = I,6 \cdot 0,427 \cdot 0,5 \cdot I0^{-3} \cdot I0^6 = 340 \text{ а.}$$

II0. М.д.с. возбуждения электродвигателя под нагрузкой – $F_{вн}$:

$$F_{вн} = F_{NSH} + F_{ст} + F_{щ} + F_ц + F_к + F_{\delta g} = 3093,3 + 386 + I80 + 204,4 + 93,8 + 340 = 4297,5 \text{ а.}$$

6. Обмотка возбуждения

III. Количество витков обмотки возбуждения – $W_в$

Выбираем $W_в = 2 \cdot W_к$ = 2 . 500 = 1000 витков.

II2. Ток возбуждения – $I_в$:

$$I_в = \frac{1,14 \cdot F_{вн}}{W_в} = \frac{1,14 \,.\, 4297,5}{1000} = 4,9 \text{ а}.$$

II3. Сечение и марка провода обмотки возбуждения.

Провод марки ПЭТВ $d/d_{из} = 1,68 \cdot 10^{-3}/1,79 \cdot 10^{-3}$ м,

$$S_в = 2,22 \,.\, 10^{-6} \text{ м}^2.$$

II4. Плотность тока в обмотке возбуждения – $\Delta_в$:

$$\Delta_в = \frac{I_в}{S_в} = \frac{4,9}{2,22 \cdot 10^{-6}} = 2,2 \,.\, 10^6 \text{ а/м}^2.$$

II5. Площадь поперечного сечения катушки обмотки возбуждения – $S_{кв}$:

$$S_{кв} = W_к \cdot d_{из}^2 k_p = 500 \,.\, 1,79^2 \,.\, 1,2 = 0,00192 \text{ м}^2.$$

II6. Ширина катушки обмотки возбуждения – $в$:

Принимаем $в$ = 0,042 м.

II7. Высота катушки обмотки возбуждения – $h_к$:

$$h_к = \frac{S_{кв}}{в_к} = \frac{0,00192}{0,042} = 0,046 \text{ м}.$$

II8. Средний диаметр катушки возбуждения – $D_к$:

$$D_к = D_{щ} + h_к = 0,158 + 0,046 = 0,204 \text{ м}.$$

119. Длина провода обмотки возбуждения – $L_в$:

$$L_в = 2 \cdot \pi \cdot D_к \cdot W_к = 2\,\pi \cdot 0{,}204 \cdot 500 = 640 \text{ м}.$$

120. Сопротивление обмотки возбуждения – $r_в$ при 348^0К (75^0С):

$$r_в = \frac{L_в}{\gamma \cdot S_в} = \frac{640}{46 \cdot 10^6 \cdot 2{,}22 \cdot 10^{-6}} = 6{,}27 \text{ ом}.$$

121. Мощность потерь обмотки возбуждения – $P_в$:

$$P_в = I_в^2 \cdot r_в = 4{,}9^2 \cdot 6{,}27 \cdot 10^{-3} = 0{,}15 \text{ квт}.$$

122. Напряжение питания обмотки возбуждения – $U_в$:

$$U_в = I_в \cdot r_в = 4{,}9 \cdot 6{,}27 = 30{,}7 \text{ в}.$$

123. Суммарные потери в машине с учетом потерь в обмотке возбуждения – $\Sigma p'$:

$$\Sigma p' = \Sigma p + P_в = 1{,}17 + 0{,}15 = 1{,}32 \text{ квт}.$$

124. Коэффициент полезного действия электродвигателя – η :

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100}{P_2 + \Sigma p'} = \frac{10}{10 + 1{,}32}\, 100 = 88{,}5\ \%.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. К о с т е н к о М.П., К о н и к Б.Е. Определение основной и третьей гармоник поля якоря и поля полюсов явнополюсной синхронной машины. - Электричество, 1951, 3.

2. А п с и т В.В. Особенности магнитной цепи синхронной машины без скользящих контактов. - Изв. АН ЛатвССР, 1957, 4.

3. А п с и т В.В. Некоторые вопросы проектирования синхронных машин с когтеобразными полюсами. - В кн.: Системы электроснабжения транспортных средств, 1. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1958.

4. К у ц е в а л о в В.М. Учет изменения рассеяния магнитной цепи индуктора синхронной машины при нагрузке.-В кн.: Системы электроснабжения транспортных средств, 1. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1958.

5. П о с т н и к о в И.М., П а в л о в В.М., Б е р т о к Ф.А. Методы расчета параметров, поверхностных потерь и нагрева синхронных и асинхронных машин с массивным ротором. - Вестник электропромышленности, 1958, 6.

6. П о с т н и к о в И.М. Вихревые токи в синхронных и асинхронных машинах с массивным ротором. - Электричество, 1958, 10.

7. А п с и т В.В. Синхронные машины с когтеобразными полюсами. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1959.

8. А п с и т В.В. Геометрия когтеобразных полюсов. - В кн.: Системы электроснабжения транспортных средств, вып. 2, Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1959.

9. А п с и т В.В. Добротность магнитопроводов. - В кн.: Системы электроснабжения транспортных средств, П. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1959.

10. К у ц е в а л о в В.М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами. Автореферат канд.дисс. Баку, 1959.

11. Л и т в а к Л.В. Наивыгоднейший $\cos\varphi$ синхронных двигателей.-В кн.: Синхронные двигатели. М.-Л., ГЭИ, 1959.

12. С о р о к е р Т.Я. Многофазный асинхронный двигатель. Многофазный асинхронный преобразователь частоты. Поверочный расчет. М., ЦБТИ НИИ электропромышленности, 1959.

13. А п с и т В.В., К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные электродвигатели ДМК-1 и ДМК-2.-Бюллетень технико-экономической информации ВИНИТИ РСФСР, 1960, 7.

14. П о с т н и к о в И.М. Проектирование электрических машин. Киев, ГИТЛ, 1960.

15. Т у м а н о в В.Н. Индуктивное сопротивление синхронной машины с внешнезамкнутым магнитным потоком при установившемся симметричном режиме работы. - Вестник электропромышленности, 1960, 10.

16. А п с и т В.В. Классификация бесконтактных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, 1. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.

17. К у ц е в а л о в В.М. Конструктивные схемы бесконтактных синхронных электродвигателей. - Научно-техническая конференция по бесконтактным электрическим машинам. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.

18. К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные электродвигатели для привода производственных механизмов. - В кн.:

Бесконтактные электрические машины, I. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.

19. К у л и з а д е К.Н., Х а й к и н И.Е. Синхронные двигатели без машинного возбудителя. - В кн.: Сб. научно-технической информации, вып. I. Баку, 1961.

20. С и к а Э.К. Упрощенная методика расчета распределения индукции на поверхности расточки статора в синхронных машинах с когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, I. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.

21. Ш т у р м а н Г.И., А п с и т В.В., К р о г е р и с А.Ф. Проблема бесконтактности электрических машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, I. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.

22. А п с и т В.В. Особые виды симметрии в машинах с когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, 2. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.

23. А п с и т В.В. Коэффициент формы активной поверхности когтеобразного полюса. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, 2. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.

24. А п с и т В.В. Магнитная проводимость междуполюсного рассеяния в машинах с когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, 2. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.

25. А п с и т В.В. Классификация бесконтактных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины. ЦИНТИЭЛЕКТРОПРОМ, 1962.

26. В а й в а р с Ю.Ф. Бесконтактные синхронные двигатели с массивными когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтакт-

ные электрические машины. ЦИНТИ, 1962.

27. У р у с о в И.Д., М у р ы г и н А.И., П о л я ш о в Л.И., Р ы ж к о в В.С. Некоторые особенности бесконтактных синхронных машин с внешнезамкнутым магнитным потоком. - Труды ВНИИЭМ, 1962, 23.

28. К у ц е в а л о в В.М. Опытная серия трехфазных бесконтактных синхронных двигателей. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.

29. К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактный синхронный электродвигатель с внешним магнитопроводом. - Труды Киевского высшего инженерного училища ВВС, 1962, 110.

30. К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные двигатели. - В кн.: Бесконтактные электрические машины. ЦИНТИ-Электропром, 1962.

31. К у ц е в а л о в В.М., Н о в о к ш о н о в Н.А. Бесконтактный синхронный электродвигатель с автоматикой системы возбуждения на полупроводниковых приборах. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, II. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.

32. С ы р о м я т н и к о в И.А. Бесконтактные электрические машины. - Материалы I научно-техн. конференции по бесконтактным электрическим машинам. М., 1962.

33. Т у м а н о в В.М. Расчетное и экспериментальное определение сверхпереходных параметров синхронных машин с внешнезамкнутым магнитным потоком. - Вестник электропромышленности, 1962, 6.

34. А п о и т В.В. Синхронные машины с когтеобразными полюсами. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.

35. А п с и т В.В., С и к а Э.К. Внешнее рассеяние когтеобразной полюсной системы. – В кн.: Бесконтактные электрические машины, Ш. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.

36. А п с и т В.В. Методика выбора основных размеров синхронной машины с когтеобразными полюсами и внешним магнитопроводом. – Доклад на П Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Рига, 1963 (ротапринт).

37. А п с и т В.В. Междуполюсная н.с. синхронной машины. – В кн.: Бесконтактные электрические машины, Ш. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.

38. А п с и т В.В., С и к а Э.К. Относительная магнитная проводимость междуполюсного рассеяния в машинах с когтеобразными полюсами. – Доклад на П Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Рига, 1963 (ротапринт).

39. Б е р т и н о в А.И., Г о л у б е н к о Я.А. Магнитная проводимость междуполюсного рассеяния когтевых машин.– Тезисы докладов П Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Рига, 1963.

40. Б е р т и н о в А.И., Г о л у б е н к о Я.А. Торцевое рассеяние бесконтактных синхронных машин с внешнезамкнутым потоком. – Тезисы докладов П Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Рига,1963.

41. Д а н и л е в и ч Я.Б., К а ш а р с к и й Э.Г. Добавочные потери в электрических машинах. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.

42. К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные электродвигатели малой и средней мощности. – Электричество,

1963, II.

43. К у ц е в а л о в В.М. Трехфазные бесконтактные синхронные электродвигатели опытной серии СО. ЛатИНТИ, 1963.

44. К у ц е в а л о в В.М. Геометрия магнитной цепи и весовые показатели бесконтактных синхронных электродвигателей. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, Ш. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.

45. С и к а З.К. Магнитная проводимость внутреннего рассеяния индуктора с когтеобразными полюсами постоянной ширины.-В кн.: Бесконтактные электрические машины, Ш. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.

46. А п с и т В.В. Электрические машины с когтеобразными полюсами. Автореф. докт. дисс. Рига, 1964.

47. Т у м а н о в В.И. Определение переходных и сверхпереходных параметров синхронных машин с внешнезамкнутым магнитным потоком. - Электротехника, 1964, 4.

48. А п с и т В.В., Д а у г у л и с Х.Л. Методика выбора основных размеров синхронной машины с когтеобразными полюсами и внутренним магнитопроводом. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, У. Рига, "Зинатне", 1965.

49. А п с и т В.В. Продольное магнитное поле в воздушном зазоре синхронной машины с когтеобразными полюсами трапецеидальной формы. - В кн.: Магнитное поле в электрических машинах. Рига, "Зинатне", 1965.

50. В и т о л и н ь ш Я.А., Г л у х о в В.П., К у ц е в а л о в В.М., О б у ш е в Г.К. Исследование компаундированного бесконтактного синхронного электродвигателя. - Изв. АН ЛатвССР, 1965, 6.

51. Даугулис Х.Л. Определение веса якоря электрической машины в зависимости от электромагнитных нагрузок. - Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. и техн. наук, 1965, 4.

52. Куцевалов В.М. Синхронные машины с массивными полюсами. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1965.

53. Сика З.К. Магнитное поле в пространстве между якорем и индуктором синхронных машин с когтеобразными полюсами. Канд. дисс. Рига, 1965.

54. Сика З.К. Коэффициенты поля возбуждения и реакции якоря для явнополюсной синхронной машины с полюсами переменной ширины. - В кн.: Магнитное поле в электрических машинах. Рига, "Зинатне", 1965.

55. Сика З.К. Магнитная проводимость воздушного зазора машины с когтеобразными полюсами. - В кн.: Магнитное поле в электрических машинах. Рига, "Зинатне", 1965.

56. Сика З.К. Магнитная проводимость междуполюсного рассеяния когтеобразного индуктора с полюсами переменной ширины. - В кн.: Магнитное поле в электрических машинах. Рига, "Зинатне", 1965.

57. Апсит В.В. Методика выбора основных размеров синхронной машины с когтеобразными полюсами и внешним магнитопроводом. - Труды П Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. М., ВНИИЭМ, 1966.

58. Вайварс Ю.Ф., Скрузитис К.Э. Синхронные бесконтактные электродвигатели для химической промышленности. - Труды Ш Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, П. Рига, "Зинатне", 1966.

59. В и т о л и н ь ш Я.А. Определение параметров синхронной машины малой и средней мощности в зависимости от нагрузки. - Труды Ш Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, П. Рига, "Зинатне", 1966.

60. Л а у ц и с Г.Н. Синхронный двигатель с двукратным использованием магнитного потока и питанием от сети переменного тока с частотой 400 гц. - Труды Ш Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, П. Рига, "Зинатне", 1966.

61. О г а н я н Р.В. Поле в воздушном зазоре синхронной машины с учетом насыщения. - Электротехника, 1966, 8.

62. Д а у г у л и с Х.Л. Выбор относительной длины синхронной явнополюсной машины малой мощности. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, У. Рига, "Зинатне", 1967.

63. Д р о з д о в В.А. Влияние поверхностных потерь от высших гармонических м.д.с. якоря на механическую характеристику асинхронной машины с массивным ротором. - Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. и техн. наук, 1967, 4.

64. К а л н ы н ь ш И.Р. Особенности и свойства бесконтактного маховичного синхронного генератора с когтеобразными полюсами и наружным ротором. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УI. Рига, "Зинатне", 1967.

65. К у ц е в а л о в В.М. Основы теории и методы расчета синхронных и асинхронных машин с массивными элементами магнитных цепей. Автореф. докт. дисс. Рига, 1967.

66. К у ц е в а л о в В.М., В и т о л и н ь ш Я.А. Схемы замещения, относительные характеристики и геометрические места токов синхронных машин. - Изв. АН ЛатвССР, сер.

физ. и техн. наук, 1967, 2.

67. К у ц е в а л о в В.М. Схемы замещения и параметры массивных ферромагнитных проводников при резком проявлении поверхностного эффекта. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УI. Рига, "Зинатне", 1967.

68. К у ц е в а л о в В.М.Опытная серия трехфазных бесконтактных синхронных электродвигателей. Рига, "Зинатне", 1967.

69. Р а д и о н о в И.Е., С и у н о в Н.С. Угловые характеристики явнополюсной машины с учетом насыщения по двум осям. - Труды Уральского политехнического ин-та, 157. Исследование параметров и цепей возбуждения машин переменного тока. Свердловск, 1967.

70. Р ы ж к о в В.С. Добавочные потери в бесконтактных синхронных машинах с когтеобразным ротором. - Электротехника, 1967, 5.

71. А п с и т В.В. Междуполюсная н.с. и полный поток аксиальной синхронной машины как функции электромагнитных нагрузок. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УП. Рига, "Зинатне", 1968.

72. Д а н и л е в и ч Я.Б., Д о м б р о в с к и й В.В., К о з о в с к и й Е.А. Параметры электрических машин переменного тока. М.-Л., "Наука", 1968.

73. З и л ь б е р ш т е й н Л.А., Р ы ж к о в В.С. Уточнение исходных положений для расчета поля рассеяния когтеобразного ротора. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УП. Рига, "Зинатне", 1968.

74. К у ц е в а л о в В.М., В и т о л и н ь ш Я.А. Об индуктивном сопротивлении реакции якоря явнополюсной

синхронной машины. - Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. и техн. наук, 1968, 3.

75. Р ы ж к о в В.С. Методика расчета магнитной проводимости междуполюсного рассеяния в машинах с когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УП. Рига, "Зинатне", 1968.

76. С и к а З.К. Геометрия когтеобразных индукторов. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УП. Рига, "Зинатне", 1968.

77. А п с и т В.В. Современные проблемы теории бесконтактных электрических машин. - Изв. АН ЛатвССР, 1969, 3.

78. В и т о л и н ь ш Я.А., К у ц е в а л о в В.М. Новая векторная диаграмма явнополюсной машины. - Изв. АН ЛатвССР, 1969, 4.

79. Д а у г у л и с Х.Л. Аналитические выражения для веса и потерь синхронных машин малой мощности. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УШ. Рига, "Зинатне", 1969.

80. Каталог-справочник. Асинхронные электродвигатели единой серии А2 и АО2 мощностью от 0,6 до 100 квт. М., Информэлектро, 1969.

81. С е р г е е в П.С., В и н о г р а д о в Н.В., Г о р я и н о в Ф.А. Проектирование электрических машин. М., "Энергия", 1969; 1970.

82. У р у с о в Н.Д., З и л ь б е р ш т е й н Л.А. Поверхностный эффект в массивном рифленом роторе при воздействии зубцовых гармонических магнитного поля. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УШ. Рига, "Зинатне", 1969.

83. А п с и т В.В. Исторический обзор развития бесконтактных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.

84. З и л ь б е р ш т е й н Л.А. Эквивалентная амплитуда зубцовых пульсаций на поверхности полюсов. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.

85. К о в а л ю к Л.А. О сравнении показателей двигательного и генераторного режимов работы бесконтактных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.

86. К о в а л ю к Л.А. Пути повышения эффективности использования электротехнического оборудования на промышленных предприятиях. Рига, МИПКСНХ, 1970 (ротапринт).

87. К у ц е в а л о в В.М., Я г о л к о в с к и й А.К. Синхронный явнополюсный двигатель с возбуждением от третьей гармоники поля. - Изв. АН ЛатвССР, 1970, 5.

88. Л а п ш и н В.К. Проблема учета насыщения в синхронных явнополюсных машинах (обзор предложенных методов). - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.

89. М у р ы г и н А.И. Магнитные системы торцевых бесконтактных синхронных машин с электромагнитным возбуждением. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.

90. Р ы ж к о в В.С. Исследование и расчет магнитного поля и добавочных потерь в бесконтактных синхронных машинах с когтеобразными роторами. Автореф. канд.дисс. М., 1970.

91. У р у с о в И.Д., Р ы ж к о в В.С., З и л ь б е р ш т е й н Л.А., В о л ч к о в В.И. Серия бесконтактных генераторов мощностью до 100 квт для ветроэлектрических агрегатов. - Электромеханика, 1970, I.

92. Б а ч е л и с Д.С., Б е л о р у с о в Н.И., С а а к я н А.Е. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. М., "Энергия", 1971.

93. В и т о л и н ь ш Я.А. Определение насыщенного значения индуктивного сопротивления реакции якоря синхронной явнополюсной машины по поперечной оси. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, X. Рига, "Зинатне", 1971.

94. Д р о з д о в В.А. Перегрузочная способность синхронных электродвигателей малой мощности. - В кн.: Бесконтактные синхронные машины, X. Рига, "Зинатне", 1971.

95. Д р о з д о в В.А. Анализ пусковых характеристик синхронных электродвигателей с массивными ферромагнитными полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, X. Рига, "Зинатне", 1971.

96. К о в а л ю к Л.А. О конструкции ротора бесконтактной синхронной машины. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, X. Рига, "Зинатне", 1971.

97. К о в а л ю к Л.А. Расчеты электротехнического оборудования на промышленных предприятиях. Рига, 1971 (ротапринт).

98. С и к а Э.К. Расчет магнитных потоков рассеяния индуктора синхронной машины с консольным когтеобразным ротором. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, X. Рига, "Зинатне", 1971.

99. К о в а л ю к Л.А. Об использовании векторных диаграмм при расчете явнополюсных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, XI. Рига, "Зинатне", 1972.

100. К о в а л ю к Л.А. Определение отдельных потерь в бесконтактных синхронных двигателях. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, XI. Рига, "Зинатне", 1972.

101. К у ц е в а л о в В.М. Синхронные машины в установившихся симметричных режимах. Основы общей линейной теории. Рига, "Зинатне", 1972.

102. К у з н е ц о в Б.И., С о р о к е р Т.Г. Асинхронные электродвигатели мощностью до 400 квт. М., Информэлектро, 1972.

103. В и т о л и н ь ш Я.А., К а н т е р В.К., К у ц е в а л о в В.М. О комплексном сопротивлении реакции якоря синхронных явнополюсных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, XI. Рига, "Зинатне", 1972.

104. К о в а л ю к Л.А., К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные электродвигатели унифицированной серии СДБ мощностью от 1,5 до 40 квт. Рига, "Зинатне", 1973 (ротапринт).

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение 3

I. Основные свойства и некоторые технические данные бесконтактных синхронных двигателей 4

2. Конструктивные особенности бесконтактных синхронных электродвигателей 7

3. Электромагнитный расчет I4

Пример. Расчет бесконтактного синхронного электродвигателя мощностью I0 квт 50

Литература 75

Виталий Михайлович Куцевалов,
Леонид Александрович Ковалюк

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ
БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
С ВНЕШНИМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Редактор А. П у г а ч е в а. Корректор Л. Л ю б и м о в а. Технический редактор Э. П о ч а. Подписано к печати 28 ноября I973 г. 5,5 печ.л.; 2,97 уч.-изд.л. Тираж 500 экз. ЯТ 06473. Цена I8 коп. Издательство "Зинатне", г.Рига, ул. Тургенева, I9. Отпечатано на ротапринте ФБ АН Латвийской ССР, г.Рига, ул.Комунала, 4.

Заказ № 195